



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων**

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΠΙ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ
ΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ ΑΝΟΙΚΤΩΝ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΕΞΟΡΥΞΕΩΝ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Γκαϊδατζόγλου Κωνσταντίνος
Γεωλόγος, Ε.Κ.Π.Α**

υπό την επίβλεψη του καθηγητή Ε.Μ.Π. Λουπασάκη Κωνσταντίνου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



NATIONAL AND TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

**Interdisciplinary Postgraduate Programme
Design and Construction of Underground Works**

**PARAMETRIC SIMULATIONS ON THE STABILITY CONDITIONS OF
THE MINING SLOPES OF OPEN PIT COAL MINES BY APPLYING THE
FINITE ELEMENT METHOD**

Master of Science Thesis

Gkaidatzoglou Konstantinos

BSc Geologist, National and Kapodistrian University of Athens

under the supervision of Prof Dr Loupasakis Constantinos

Athens, February 2024

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 29/02/2024

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Τσαγγαράτος Παρασκευάς, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθανασάς Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....

ΓΚΑΪΔΑΤΖΟΓΛΟΥ Α. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Γεωλόγος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

© 2024 – All rights reserved

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω τις πιο θερμές ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου σε όλους τους ανθρώπους, των οποίων η βοήθεια και η συμπαράσταση ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας στο πλαίσιο της φοίτησης μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών (Δ.Π.Μ.Σ.) του Ε.Μ.Π. με τίτλο «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Λουπασάκη Κωνσταντίνο για την ανάθεση του θέματος, δίνοντας μου την δυνατότητα να εμβαθύνω στο γνωστικό αντικείμενο όπου πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την συνεργασία μας και τις πολύτιμες γνώσεις όπου μου μετέδωσε.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Μποτσιαλά Κωνσταντίνο, Δρ. Γεωλόγο, για την συνεισφορά του και τον χρόνο όπου αφιέρωσε στην εξέλιξη μου ως επαγγελματίας και επιστήμονας, την στήριξη και την κατανόηση του κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου, η οποία με στηρίζει σε κάθε βήμα της ζωής μου, προσφέροντας μου βοήθεια και ώθηση να επιτύχω τους στόχους που θέτω.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αφορά την παραμετρική διερεύνηση της ευστάθειας των πρανών της ανοικτής εκσκαφής στο πεδίο Χωρεμίου του λιγνιτικού κέντρου Μεγαλόπολης. Μέσω των επιλεγμένων σειρών παραμετρικών αναλύσεων, η εργασία επικεντρώνεται στην επίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών όπου συναντώνται στο πεδίο Χωρεμίου, όπως τα στρώματα αργίλου, όπου εντοπίζονται ανάμεσα στις λιγνιτικές στιβάδες και των Τεταρτογενών αποθέσεων ερυθρής αργίλου, των μεταβολών της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και της γεωμετρίας της εκσκαφής. Οι αριθμητικές αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων εκτελέστηκαν με χρήση του προγράμματος Plaxis 2D. Πιο συγκεκριμένα, οι μηχανικές ιδιότητες όπου εξετάστηκαν ήταν η συνοχή, η εσωτερική γωνία τριβής και το μέτρο ελαστικότητας. Στην συνέχεια, στη δεύτερη σειρά αναλύσεων έγινε εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα και εξετάστηκε η αλληλεπίδραση των παραπάνω μηχανικών παραμέτρων και των υπόγειων υδάτων. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα όπου επιλέχθηκε να εξεταστεί σε πρώτο στάδιο αποτελεί ένα δυσμενές, αλλά ρεαλιστικό σενάριο. Στην συνέχεια, στο πλαίσιο μετριασμού των υψηλών μετακινήσεων και των ζητημάτων ευστάθειας εξετάστηκε η επίδραση της σταδιακής μείωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε τρεις φάσεις. Τέλος, στο αρχικό δυσμενές σενάριο με την υψηλή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα εξετάστηκε το σενάριο μεταβολής της γεωμετρίας της εκσκαφής και η διαμόρφωση ηπιότερης κλίσης σε ορισμένο τμήμα της εκσκαφής, με αφαίρεση τμήματος της ανώτερης λιγνιτικής στιβάδας του προσομοιώματος. Συνεπώς, αυτή η ολιστική προσέγγιση προσδιορίζει τον κομβικό ρόλο της κατάλληλης διαχείρισης των υπογείων υδάτων στους χώρους εκμετάλλευσης και της γεωμετρίας των ανοικτών εκσκαφών στην ευστάθεια των ορυχείων συναρτήσει των μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών της περιοχής μελέτης.

ABSTRACT

This master's thesis concerns the parametric investigation of the stability of the slopes of the open excavation in the Choremi field of the Megalopolis lignite center. Through the selected series of parametric analyses, the research focuses on the influence of the mechanical characteristics of the formations encountered in the Choremi field, such as the clay layers, which are located between the lignite layers and the Quaternary red clay deposits. Moreover, the research also focuses on the impact the changes in the water table level and the geometry of the excavation have on the overall slope stability of the open pit. Numerical finite element analyses were performed using the Plaxis 2D program. More specifically, the mechanical properties investigated were cohesion, internal friction angle, and modulus of elasticity of the two clay formations. Then, in the second set of analyses, the aquifer level was introduced into the simulation, and the interaction of the above mechanical parameters and groundwater was examined. The chosen water table level of the first scenario is an unfavourable but realistic scenario for the area examined. Subsequently, in the context of mitigating high-ground movement and stability issues, the effect of a gradual reduction of the water table level was examined in three phases. Finally, in the initial adverse scenario of the second series of analyses, the concept of changing the geometry of the excavation and the adoption of a less steep slope design in a certain part of the excavation, with the removal of part of the upper lignite layer of the simulation, was considered. Thus, this methodology highlights the importance of effective groundwater management, and the design of the open-pit excavations bears on slope stability, considering the mechanical properties of the geological formation within the study area.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1	ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ	13
1.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
1.2	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΞΟΡΥΞΕΙΣ	13
1.3	ΑΞΙΟΣΗΜΕΙΩΤΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ	18
1.3.1	<i>ΑΝΘΡΑΚΩΡΥΧΕΙΟ COALBROOK, ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ, 1960.....</i>	<i>18</i>
1.3.2	<i>ΟΡΥΧΕΙΟ MATHILDE, ΓΕΡΜΑΝΙΑ, 1963.....</i>	<i>20</i>
1.3.3	<i>ΟΡΥΧΕΙΟ QUECREEK, Η.Π.Α., 2002.....</i>	<i>22</i>
1.3.4	<i>ΟΡΥΧΕΙΟ SAN JOSÉ, ΧΙΛΗ, 2010.....</i>	<i>27</i>
1.3.5	<i>ΟΡΥΧΕΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ, ΕΛΛΑΔΑ, 2017.....</i>	<i>31</i>
1.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ	34
2	ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	35
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	35
2.2	ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	35
2.2.1	<i>ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....</i>	<i>37</i>
2.3	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	41
2.4	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ	52
2.4.1	<i>ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΓΝΙΤΗ.....</i>	<i>52</i>
2.4.2	<i>ΛΙΓΝΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ.....</i>	<i>52</i>
2.4.3	<i>ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ.....</i>	<i>55</i>
2.5	ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ.....	56
3	ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ.....	63
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	63
3.2	ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ.....	63
3.3	ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ (LEM)	65
3.4	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	66
3.5	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (PLAXIS 2D)	68
4	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	75
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	75
4.2	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	78
4.2.1	<i>1^η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΡΓΙΛΟΥ ΚΑΙ ΕΡΥΘΡΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ.....</i>	<i>78</i>

4.2.2	2 ^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΡΓΙΛΟΥ ΚΑΙ ΕΡΥΘΡΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ, ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ	84
4.2.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 1 ^Η Σ ΚΑΙ 2 ^Η Σ ΣΕΙΡΑΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ.....	89
4.2.4	3 ^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ	90
4.2.5	4 ^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΗΠΙΟΤΕΡΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ	101
4.3	ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ	106
4.3.1	ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ.....	107
4.3.1.1	ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΡΑΝΤΑΡ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ (InSAR)	107
4.3.1.2	ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ	109
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	111
6	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	113
6.1	ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	113
6.2	ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	122
6.3	ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	123
7	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ	124
7.1	1 ^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	124
7.2	2 ^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	131
7.3	3 ^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	138
7.4	4 ^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	141

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Ανάπτυξη των δύο γειτονικών ορυχείων Quecreek και Harrison, όπου υποδεικνύονται οι περιοχές εγκλωβισμού και οι περιοχές πληρωμένες με νερό (MSHA, 2002).	22
Εικόνα 2. Εγκάρσια τομή στο ορυχείο όπου απεικονίζονται χρονικά τα βασικά γεγονότα από το αρχικό συμβάν έως την επιτυχή διάσωση των μεταλλωρύχων (MSHA, 2002).	24
Εικόνα 3. Η διάσωση ενός εκ των μεταλλωρύχων με την χρήση της κάψουλας (Quecreek Mine Rescue Site).	25
Εικόνα 4. Διάταξη της υπόγειας ανάπτυξης του ορυχείου (BBC News, 2010).	28
Εικόνα 5. Τα τρία διαφορετικά σχέδια διάσωσης των εγκλωβισμένων μεταλλωρύχων (Twin Cities: Pioneer Press, 2010).	29
Εικόνα 6. Άποψη της καταστροφής του οδικού δικτύου όπου υπέστη ο οικισμός Αναργύρων (Loupasakis, 2020).	31
Εικόνα 7. Άποψη του βορειοδυτικού τμήματος της εκσκαφής, στο οποίο παρατηρείται απουσία υδάτων εξαιτίας των αποστραγγιστικών έργων (Loupasakis, 2020).	33
Εικόνα 8. Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Μεγαλόπολη).	35
Εικόνα 9. Δορυφορική εικόνα (Google Earth) όπου εντοπίζεται το Δημοτικό Διαμέρισμα Χωρέμη, η νέα κοίτη του ποταμού Αλφειού και το λιγνιτωρυχείο Μεγαλόπολης.	37
Εικόνα 10. Άποψη της περιοχής Χωρέμη και της νέας κοίτης του Αλφειού Ποταμού ύστερα από την εκτροπή του.	38
Εικόνα 11. Απόσπασμα από γεωλογικό χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Μεγαλόπολη (ΙΓΜΕ, 1997).	42
Εικόνα 12. Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Μεγαλόπολη (ΙΓΜΕ, 1997).	43
Εικόνα 13. Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Μεγαλόπολη (ΙΓΜΕ, 1997).	44
Εικόνα 14. Στρωματογραφική στήλη φύλλου χάρτη Μεγαλόπολης, (ΙΓΜΕ, 1997).	45
Εικόνα 15. Συσχετισμός των στρωματογραφικών στηλών της λεκάνης Μεγαλόπολης (ΙΓΜΕ, 1997).	46
Εικόνα 16. Υδρογεωλογικός χάρτης Μεγαλόπολης – Δημητσάνας (Γεωτεκτονικός-Υδρογεωλογικός Χάρτης ΙΓΜΕ), (Τσιφτσής 1986).	57
Εικόνα 17. Σχεδιάγραμμα προσομοιώματος κατά την αρχική κατασκευαστική φάση.	69
Εικόνα 18. Εισαγωγή της στρωματογραφίας στο προσομοίωμα.	69
Εικόνα 19. Εισαγωγή των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων ενός εκ των σχηματισμών του προσομοιώματος.	70
Εικόνα 20. Απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων συνδεδεμένα σε πλέγμα (mesh).	70
Εικόνα 21. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων σε μεταγενέστερη φάση.	70
Εικόνα 22. Διαμόρφωση της τελικής γεωμετρίας του προσομοιώματος.	71
Εικόνα 23. Εισαγωγή των κατασκευαστικών φάσεων της προσομοίωσης και του τύπου υπολογισμού. ..	72
Εικόνα 24. Απεικόνιση των ολικών μετακινήσεων της εκσκαφής κατά την χρήση του υπο-προγράμματος Plaxis Output.	73

Εικόνα 25. Απεικόνιση πιθανής επιφάνειας αστοχίας κατά την χρήση του υπο-προγράμματος Plaxis Output.	74
Εικόνα 26. Απεικόνιση του προσομοιώματος με τα σημεία ελέγχου όπου επιλέχθηκαν για τον έλεγχο των μετακινήσεων και του συντελεστή ασφαλείας.	79
Εικόνα 27. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	80
Εικόνα 28. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου.	81
Εικόνα 29. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου για τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.	82
Εικόνα 30. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	83
Εικόνα 31. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα.	84
Εικόνα 32. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	85
Εικόνα 33. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου.	86
Εικόνα 34. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα (-6m), ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου για τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.	87
Εικόνα 35. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	88
Εικόνα 36. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 10m.	91
Εικόνα 37. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 20m.	91
Εικόνα 38. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 30m.	91
Εικόνα 39. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 10 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	92

Εικόνα 40. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 20 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	93
Εικόνα 41. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 30 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	94
Εικόνα 42. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας συναρτήσει της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	95
Εικόνα 43. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, συναρτήσει της στάθμης του υδροφόρου για τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.....	96
Εικόνα 44. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 10m.....	98
Εικόνα 45. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 20m.	99
Εικόνα 46. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 30m.	100
Εικόνα 47. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων του προσομοιώματος.....	101
Εικόνα 48. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με αφαίρεση τμήματος της ανώτερης λιγνιτικής στιβάδας, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	102
Εικόνα 49. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας συναρτήσει της γεωμετρίας της ανοικτής εκσκαφής, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	103
Εικόνα 50. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, συναρτήσει της γεωμετρίας της ανοικτής εκσκαφής, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	104
Εικόνα 51. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa	

για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου στην περίπτωση αφαίρεσης υλικού και εφαρμογής ηπιότερων κλίσεων.	105
Εικόνα 52. Βασική αρχή λειτουργίας συστημάτων συμβολομετρίας εδάφους (Pieraccini & Miccinesi, 2019).	109
Εικόνα 53. Σύστημα GBRI της εταιρίας IDS Georadar, εξοπλισμένο με αισθητήρα ραντάρ και IR αισθητήρα, για παρακολούθηση της ευστάθειας σε πραγματικό χρόνο (IDS GeoRadar, 2024).	110
Εικόνα 54. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	124
Εικόνα 55. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	125
Εικόνα 56. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	126
Εικόνα 57. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	127
Εικόνα 58. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	128
Εικόνα 59. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	129
Εικόνα 60. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	130
Εικόνα 61. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	131
Εικόνα 62. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	132
Εικόνα 63. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	133

Εικόνα 64. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου	134
Εικόνα 65. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	135
Εικόνα 66. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου	136
Εικόνα 67. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	137
Εικόνα 68. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 10 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	138
Εικόνα 69. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 20 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	139
Εικόνα 70. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 30 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.....	140
Εικόνα 71. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με αφαίρεση τμήματος της ανώτερης λιγνιτικής στιβάδας, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.	141

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Πίνακας 1. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία από την έλλειψη κανόνων και κανονισμών.....	16
Πίνακας 2. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία από ανθρώπινο λάθος.	16
Πίνακας 3. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία όπου οφείλονται στην ελλιπή επίβλεψη και στα μη ορθά πλαίσια λειτουργίας.	17
Πίνακας 4. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία όπου οφείλονται σε παράγοντες γεωλογικής φύσεως.....	17
Πίνακας 5. Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής Μεγαλόπολης.....	39
Πίνακας 6. Μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του προσομοιώματος.	76
Πίνακας 7. Συνοπτική παρουσίαση των συνδυασμών των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο σχηματισμών όπου εξετάστηκαν.....	78
Πίνακας 8. Συγκεντρωτικός πίνακας με τους συντελεστές ασφαλείας (FoS) όπου προέκυψαν από την πρώτη και δεύτερη σειρά αριθμητικών αναλύσεων.....	89
Πίνακας 9. Συγκεντρωτικός πίνακας με τους συντελεστές ασφαλείας (FoS) όπου προέκυψαν από την τρίτη σειρά αριθμητικών αναλύσεων.....	97

1 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΣΕ ΑΝΟΙΚΤΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο αυτό στοχεύει στην ανάπτυξη των αιτιών πρόκλησης αστοχιών και ατυχημάτων σε ανοικτές και υπόγειες εκμεταλλεύσεις. Αρχικά, γίνεται αναφορά σε βασικούς παράγοντες, οι οποίοι συμβάλλουν στην πρόκληση μίας αστοχίας ή ενός ατυχήματος. Στην συνέχεια, πραγματοποιείται μία ιστορική αναδρομή σε αξιοσημείωτα μεταλλευτικά ατυχήματα όπου συνέβησαν κατά τον 20^ο αιώνα, ενώ στην συνέχεια παρουσιάστηκαν ορισμένες πρόσφατες αστοχίες στο χώρο της μεταλλευτικής. Τέλος, πραγματοποιείται μία αποτίμηση των κινδύνων και των συνθηκών όπου επικρατούν στην μεταλλευτική βιομηχανία, και την πρόοδο όπου έχει σημειωθεί στη βελτίωση των συνθηκών εργασίας και των πρωτοκόλλων ασφαλείας.

1.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΑΙΤΙΩΝ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΑΣΤΟΧΙΩΝ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΞΟΡΥΞΕΙΣ

Η μεταλλευτική δραστηριότητα θεωρείται ιστορικά ως μια από τις παλαιότερες βιομηχανίες παγκοσμίως (Jiang et al., 2017), και ως μια βιομηχανία υψηλού κινδύνου (Patterson and Shappell, 2010). Τα ατυχήματα, οι κίνδυνοι και οι καταστροφές έχουν πολλές ομοιότητες όσον αφορά τις σημαντικές επιπτώσεις τους στα θύματα τους (Lyra, 2019), στους ιδιοκτήτες των ορυχείων (Li et al., 2019), στους υπαλλήλους των ορυχείων (Aliabadi et al., 2018; Li et al., 2019), στις κυβερνήσεις (Lyra, 2019), στους υπευθύνους χάραξης πολιτικής (Kong et al., 2018; Dózgón & Leveson, 2018), στην οικονομία (Gui et al., 2019; Xiao et al., 2019), στις τοπικές κοινωνίες (Lyra, 2019), καθώς και στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (Shao, 2019; Cordeiro et al., 2019).

Οι φορείς εκμετάλλευσης των ορυχείων αντιμετωπίζουν μια σχετικά επικίνδυνη εργασιακή συνθήκη σε σχέση με τους φορείς εκμετάλλευσης σε άλλους τομείς (Lenné et al., 2012). Τα ατυχήματα όπου σημειώνονται στα μεταλλεία και τα λατομεία επηρεάζουν σημαντικά την βιώσιμη ανάπτυξη της παραγωγής εξόρυξης, καθώς επίσης ολόκληρη την οικονομία και την κοινωνία (Lu and Li, 2011). Σημαντικός αριθμός μελετών έχει προταθεί στον τομέα της εξόρυξης άνθρακα για να ερμηνευθούν οι παράγοντες όπου επηρεάζουν τέτοια περιστατικά (Lee et al., 2008; Paul and Maiti, 2007). Οι ερευνητές προσπάθησαν να εφαρμόσουν διαφορετικές προσεγγίσεις, οι οποίες υποστήριζαν την ανάπτυξη κάποιων μεθόδων διερεύνησης και ανάλυσης περιστατικών/ατυχημάτων (Lenné et al., 2012).

Τα παραδοσιακά μοντέλα αιτιολόγησης ενός ατυχήματος θεωρούν ότι τα ατυχήματα είναι αποτελέσματα γεγονότων, όπως αστοχία εξοπλισμού ή μη ασφαλείς συμπεριφορές του χειριστή (Underwood and Waterson, 2014), καθώς τις περισσότερες φορές η μεταλλευτική και λατομική παραγωγή είναι πλήρως εκμηχανισμένη. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ανθρώπινη συμμετοχή μειώνεται σε εργασίες, οι οποίες εμφανίζουν αυξημένη επικινδυνότητα και επιτρέπεται η πραγματοποίηση λειτουργιών εντός του μεταλλείου εξ αποστάσεως.

Παρόλα αυτά, οι Chen et al. (2009) ανέφεραν ότι τα κενά στη διαχείριση και η έλλειψη κουλτούρας ασφάλειας αποτελούν τις πλέον κύριες αιτίες μεγάλων ατυχημάτων στα ανθρακωρυχεία. Σύμφωνα με τον Page (2009), τα μεγαλύτερα ορυχεία είναι ασφαλέστερα από τα μικρότερα και τα ορυχεία με λιγότερη πίεση εργασίας ήταν ασφαλέστερα από εκείνα με μεγαλύτερη πίεση εργασίας.

Οι «μη ασφαλείς» συνθήκες και η μη τήρηση των κανονισμών αναφέρονται γενικά στην έλλειψη κανόνων και κανονισμών (Πίνακας 1), σε ακατάλληλους ή αναχρονιστικούς κανόνες και κανονισμούς, στη κακή εκτέλεση τους, στην έλλειψη εποπτείας και επιθεώρησης, και τέλος στην έλλειψη εκπαίδευσης του προσωπικού σε ζητήματα ασφάλειας (Πίνακας 2). Τα ατυχήματα συνήθως δεν προκαλούνται από μία μόνο αστοχία ή λάθος, αλλά από τη συμβολή μιας ολόκληρης σειράς ή αλυσίδας σφαλμάτων (Ren et al., 2008). Η φύση ενός ατυχήματος και τα αίτια του σε μια υπόγεια εκμετάλλευση μπορούν να αποδοθούν στην πολυπλοκότητα των σχέσεων όπου εμπεριέχονται στον σχεδιασμό και την διαχείριση (Πίνακας 3), τον εξοπλισμό, το γεωλογικό περιβάλλον (Πίνακας 4), και την συμπεριφορά του εργατικού προσωπικού μεταξύ άλλων παραγόντων. Η μεταλλευτική δραστηριότητα απαιτεί συστηματική ανάλυση και αξιολόγηση των διαδικασιών παραγωγής, του εξοπλισμού και λειτουργίας του προσωπικού για να διαμορφώσει μια σειρά από κανόνες λειτουργίας και μέτρα ελέγχου ασφάλειας, να διασφαλίσει την ομαλή παραγωγή και την ασφαλή λειτουργία, και να ελαχιστοποιήσει τους κινδύνους (Li et al., 2010).

Οι μη ασφαλείς συνθήκες του περιβάλλοντος, οι κίνδυνοι για την υγεία των εργαζομένων αναφέρονται κυρίως στις μη ασφαλείς συνθήκες του περιβάλλοντος παραγωγής και την ακατάλληλη οργάνωση της εργασίας. Κίνδυνοι όπως αυτοί εμπεριέχονται στον ανεπαρκή εξαερισμό, τον ακατάλληλο φωτισμό, την θερμοκρασία, την υπερβολική υγρασία, και τον γεωλογικό παράγοντα. Εάν ο έλεγχος και η διαχείριση των περιβαλλοντικών συνθηκών δεν είναι επαρκείς, τότε το περιβάλλον θα επιδεινωθεί και πιθανότατα θα συμβούν ατυχήματα (Zhang et al., 2016). Σύμφωνα με τους Liu and Li (2008), η διαχείριση ζητημάτων ασφάλειας επηρεάζει σημαντικά το εργασιακό περιβάλλον.

Επιπρόσθετα, σε αρκετές περιπτώσεις καταγράφονται ατυχήματα, τα οποία σχετίζονται με ζητήματα εργονομίας και κινδύνους όπου αφορούν την έλλειψη οργάνωσης της παραγωγικής διαδικασίας σε ένα εργοτάξιο. Οι κίνδυνοι αυτοί σχετίζονται με τους εντατικούς ρυθμούς και τις εξαντλητικές βάρδιες εργασίας, την ανάθεση εργαζομένων σε θέσεις ακατάλληλες για τις δυνατότητες τους και την έλλειψη επαρκούς εκπαίδευσης στο αντικείμενο τους (S.M.E., 2011).

Παρόλα αυτά, η κυριότερη αιτία ατυχημάτων στη μεταλλευτική βιομηχανία θεωρείται η μηχανική βλάβη. Πληθώρα μελετών αναφέρουν τη μηχανική βλάβη ως σημαντική αιτία ατυχημάτων εξόρυξης. Αυτό είναι αρκετά αναπάντεχο, δεδομένου ότι οι περισσότερες βιομηχανίες, όπως οι κατασκευαστικός τομέας (Kim et al., 2021) και η βιομηχανία παραγωγής (Guo et al., 2020), ενοχοποιούν τον ανθρώπινο παράγοντα ως τον κυριότερο παράγοντα πρόκλησης ενός ατυχήματος.

Η κακή μηχανική σχεδίαση χαρακτηριστικών όπως οι λίμνες τελμάτων, η δομή των υπόγειων ανθρακωρυχείων, τα συστήματα εξαερισμού και τα συστήματα φρεατίων έχουν συμβάλει σε σημαντικό αριθμό ατυχημάτων στη βιομηχανία εξόρυξης. Επιπλέον, η αστοχία εξοπλισμού ανατινάξεων και εκρηκτικών θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει σε ατυχήματα.

Οι μεταλλευτικές δραστηριότητες περιλαμβάνουν επίσης την χρήση μηχανημάτων ή μεταφορών, όπως φορητά και εκσκαφείς. Όλα αυτά απαιτούν σωστή επιθεώρηση και συντήρηση. Η παλαιότητα, και η κακή ποιότητα των μηχανημάτων μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε ατυχήματα ή καταστροφές. Συνεπώς, απαιτείται δέσμευση της εταιρείας όπου είναι υπεύθυνη για την εκμετάλλευση να διασφαλίσει την χρήσης πρακτικών ασφαλείας υψηλών προτύπων, να εξασφαλίσει την ασφάλεια των εργαζομένων στο ορυχείο και την αποφυγή ατυχημάτων μέσω της διάθεσης ενός σημαντικού ποσού ετησίως από τον προϋπολογισμό της (Zhang et al., 2016).

Πίνακας 1. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία από την έλλειψη κανόνων και κανονισμών.

Έλλειψη Κανόνων και Κανονισμών	
Έλλειψη κανόνων από τις ρυθμιστικές αρχές της τοπικής αυτοδιοίκησης	Liu et al. (2015b); Gui et al. (2019)
Απουσία επιβολής προστίμων ή νομικής κίνησης κατά της εταιρείας εξόρυξης	
Απόκρυψη των δεδομένων ασφάλειας και μη συμπερίληψη τους στην επίσημη έκθεση	

Πίνακας 2. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία από ανθρώπινο λάθος.

Ανθρώπινο Λάθος και Μη ασφαλής συμπεριφορά	
Ελλιπής εκπαίδευση σε ζητήματα ασφάλειας	Bonsu et al. (2017); Xiang et al. (2019); Li et al. (2019);
Ανεπαρκής εμπειρία	
Αγνόηση της σημασίας του ατομικού	
Αδυναμία κατανόησης της υψηλής	Zhang et al. (2016b); Qiao et al. (2018); Chen et al. (2019)
Αγνόηση των προειδοποιητικών σημάτων	
Χρήση φθαρμένου ή κακώς συντηρημένου	
Ακατάλληλη αποθήκευση εμπορευμάτων	
Μη ορθά διαμορφωμένοι χώροι εργασίας	

Πίνακας 3. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία όπου οφείλονται στην ελλιπή επίβλεψη και στα μη ορθά πλαίσια λειτουργίας.

Επίβλεψη των Προϊσταμένων και Πλαίσια Λειτουργίας	
Ανεπαρκής εποπτεία	Aliabadi et al. (2018)
Ακατάλληλο σχέδιο λειτουργίας	
Παραβίαση των καθηκόντων του	
Κακή διαχείριση	
Κακός συντονισμός	
Έλλειψη προληπτικού	
Λανθασμένες Αποφάσεις	

Πίνακας 4. Παραδείγματα αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων στα ορυχεία όπου οφείλονται σε παράγοντες γεωλογικής φύσεως.

Γεωλογικός Παράγοντας	
Αβέβαιες γεωλογικές συνθήκες	Zhang et al. (2016b); Wang et al. (2016); Shao (2019)
Σφάλμα κατά την μελέτη και τη χαρτογράφηση του γεωλογικού υποβάθρου	
Περιεχόμενο της σκόνης όπου ίπταται	
Κακή ποιότητα της βραχώμαζας	

1.3 ΑΞΙΟΣΗΜΕΙΩΤΑ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΑ ΑΤΥΧΗΜΑΤΑ

1.3.1 ΑΝΘΡΑΚΩΡΥΧΕΙΟ COALBROOK, ΝΟΤΙΑ ΑΦΡΙΚΗ, 1960

Το ατύχημα στο ανθρακωρυχείο Coalbrook αποτελεί το μεγαλύτερο στην μεταλλευτική ιστορία της Νοτίου Αφρικής. Η καταστροφή σημειώθηκε στις 21 Ιανουαρίου 1960 όταν περίπου 900 στύλοι κατέρρευσαν σε βάθος 180 m και τετρακόσιοι τριάντα επτά (437) από τους 1000 εργάτες έχασαν την ζωή τους (Martin & Maybee, 2000), καθώς παγιδεύτηκαν στον υπόγειο χώρο του ορυχείου. Η κατάρρευση των 900 στύλων επέφερε την κατάρρευση της οροφής, μίας περιοχής με επιφάνεια περίπου 3.2 km².

Οι υπόλοιποι εργάτες διέφυγαν στην επιφάνεια του ορυχείου μέσω μίας κεκλιμένης στοάς. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός πως ένας σημαντικός εργατών ένιωσε ένα δυνατό κύμα αέρα και κατευθύνθηκαν στην έξοδο του ορυχείου, διατάχθηκαν από τους φύλακες να μην διαφύγουν, καθώς θα κινδυνεύσουν με φυλάκιση. Μόνο δύο εργάτες αρνήθηκαν να παραμείνουν στον υπόγειο χώρο του ορυχείου (Cobley, 2020).

Αιτία του ατυχήματος αποτελεί η διαδοχική κατάρρευση 900 στύλων, καθώς ύστερα από την αρχική κατάρρευση ορισμένων λόγω λανθασμένου υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας τους, η ανακατανομή των τάσεων στους γειτονικούς προκάλεσε την κατάρρευση των υπολοίπων. Σημαντικός παράγοντας στην κατάρρευση των στύλων ήταν η πρόχειρη και εμπειρική διεύρυνση των θαλάμων, οι οποίοι είχαν ήδη εκμεταλλευθεί στο παρελθόν. Θάλαμοι όπου στο παρελθόν διέθεταν ύψος 2.4 m, διευρύνθηκαν σταδιακά και έφθασαν σε ύψος 4 έως 5.5 m σε ορισμένες περιοχές. Σε μία περιοχή του ορυχείου (τομέας 10) όπου είχε σταματήσει η εκμετάλλευση από τον Δεκέμβριο του 1959, το ύψος του θαλάμου είχε φθάσει μεταξύ 4.3 m και 6.1 m, με αποτέλεσμα ορισμένοι στύλοι και τμήμα της οροφής να καταρρεύσει. Το συγκεκριμένο γεγονός δεν δημιούργησε ζητήματα ευστάθειας σε άλλα τμήματα του ορυχείου, όμως δεν λήφθηκε υπόψιν από τους επιθεωρητές της εξόρυξης.

Οι υπερβολικές συγκεντρώσεις μεθανίου και μονοξειδίου του άνθρακα εντός του υπόγειου χώρου κατέστησαν αδύνατη την είσοδο των συνεργείων διάσωσης νοτιοανατολικά του τομέα 10. Η απόπειρα εισόδου των ομάδων διάσωσης από το κύριο φρέαρ του ορυχείου κρίθηκε αδύνατη εξαιτίας των υψηλών συγκεντρώσεων μεθανίου και της κατάρρευσης των στύλων. Συνεπώς, ξεκίνησαν οι διαδικασίες διάνοιξης φρέατος επάνω από το σημείο όπου πιθανώς υπήρχαν οι εγκλωβισμένοι εργάτες.

Σκληρό πυριγενές πέτρωμα, όπως ο δολερίτης όπου ήταν υπερκείμενος του κοιτάσματος προκάλεσε την γρήγορη φθορά των κοπτικών του μηχανήματος. Σε σημεία όπου πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις, μικρόφωνα τοποθετήθηκαν εντός αυτών για την ανίχνευση επιζώντων, χωρίς όμως επιτυχία. Η κύρια στοά και η είσοδος σε αυτήν σφραγίστηκε, με αποτέλεσμα οι προσπάθειες διάσωσης να σταματήσουν.

Ύστερα από αυτό το ατύχημα, οι έρευνες πάνω στην αντοχή των στύλων άνθρακα, όπως η εργασία των Salamon & Munro (1967), οδήγησαν στην υιοθέτηση της ιδέας του συντελεστή ασφαλείας για τον ασφαλή σχεδιασμό των στύλων κατά την εκμετάλλευση άνθρακα στην Νότια Αφρική (Van Der Merwe & Mathey, 2013), αλλά και παγκοσμίως (Poulsen et al., 2014; Renani & Martin, 2018).

1.3.2 ΟΡΥΧΕΙΟ MATHILDE, ΓΕΡΜΑΝΙΑ, 1963

Το ορυχείο Mathilde, στην περιοχή Lengede της Γερμανίας εξήγαγε σίδηρο, όπου για την απόπλυση του εξορυσσόμενου υλικού με νερό είχαν δημιουργηθεί τεχνητές λίμνες στην επιφάνεια, πάνω από τον υπόγειο χώρο όπου γινόταν η εκμετάλλευση. Στις 24 Οκτωβρίου 1963, οι στοές μεταξύ των επιπέδων 60 m και 100 m του ορυχείου κατακλίσθηκαν από 500.000 m³ λάσπης και νερού, τα οποία βρήκαν δίοδο μέσω των τεχνητών λιμνών όπου είχαν κατασκευασθεί. Την στιγμή εκείνη εργάζονταν στο ορυχείο 129 άτομα εκ των οποίων οι 79 διέφυγαν τις πρώτες ώρες μετά το συμβάν. Χρησιμοποίησαν φρέατα αερισμού, τα οποία διέθεταν σκάλες λόγω των κανονισμών ασφαλείας.

Την επόμενη μέρα, επτά (7) ακόμα εργάτες εντοπίστηκαν μέσω γεώτρησης, κοντά σε κόμβο μεταφορών του ορυχείου. Παρά το γεγονός ότι είχαν ξεκινήσει διαδικασίες διάνοιξης γεωτρήσεων με στόχο την διάσωση τους, εξαιτίας της εισροής υδάτων όπου συνεχιζόταν έστειλαν μήνυμα ότι θα προσπαθήσουν να διαφύγουν μόνοι τους. Ορισμένοι εργοδηγοί πήραν την απόφαση να προσπαθήσουν να συναντήσουν τους εργάτες ενδιάμεσα στις γεωτρήσεις, και να τους ανεβάσουν στην επιφάνεια.

Επίσης, τέσσερις (4) μεταλλωρύχοι παγιδεύτηκαν στον χώρο όπου εργάζονταν (τρεις (3) επέζησαν), όμως ο θύλακας αέρα δεν επέτρεπε την εισροή υδάτων σε εκείνο το σημείο. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκαν γεωτρήσεις με κατεύθυνση προς την θέση των εργατών με πεπιεσμένο αέρα, ώστε να διατηρηθεί η πίεση εντός του θύλακα αέρα. Ύστερα από τον εντοπισμό των εργατών, τους προσφέρθηκαν μέσω των γεωτρήσεων τρόφιμα και παιχνίδια. Ύστερα από έξι μέρες ολοκληρώθηκε η διάσωση τους, μέσω μίας κάψουλας διαμέτρου 38.5 cm (Dahlbusch Bomb).

Τέλος, στον υπόγειο χώρο του ορυχείου υπήρχε ένα τμήμα, το οποίο δεν ήταν υπό εκμετάλλευση, είχε εγκαταλειφθεί και η πρόσβαση σε αυτό είχε απαγορευθεί για λόγους ασφαλείας. Παρόλα αυτά, οι μεταλλωρύχοι το χρησιμοποιούσαν ως χώρο ξεκούρασης ή για μείωση των αποστάσεων.

Ύστερα από προτροπή ενός εργάτη όπου είχε διαφύγει, πραγματοποιήθηκε μία τελευταία γεώτρηση σε αυτήν την ασταθή περιοχή του ορυχείου. Η διερευνητική γεώτρηση έφθασε σε βάθος 56 m, και οι εγκλωβισμένοι εργάτες έκρουσαν την κεφαλή του γεωτράπανου ώστε να ακουστούν.

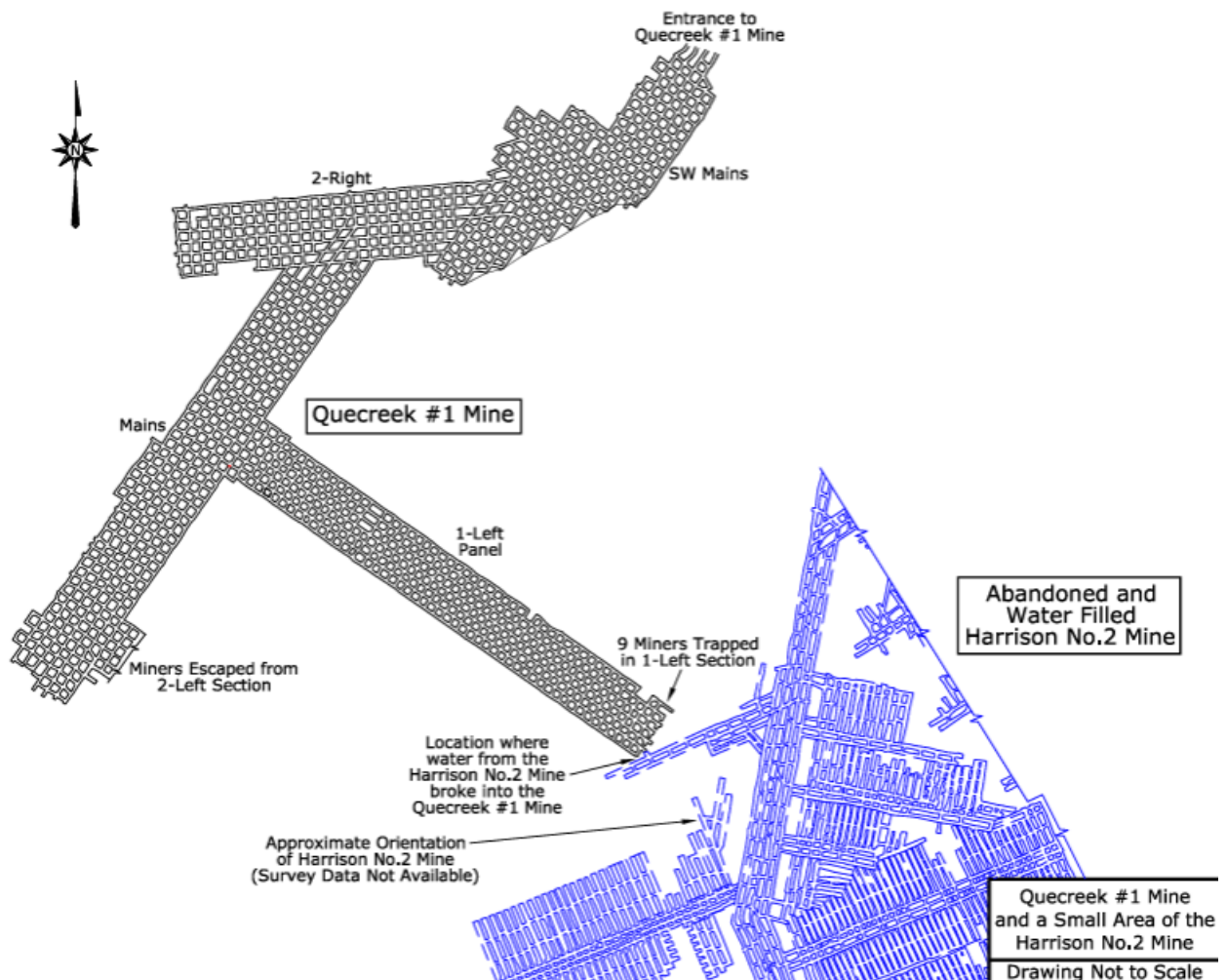
Κατά συνέπεια, ξεκίνησε η διάνοιξη μεγαλύτερης γεώτρησης, ώστε να πραγματοποιηθεί η διάσωση των μεταλλωρύχων μέσω της κάψουλας. Περισσότερα από είκοσι (20) άτομα είχαν καταφύγει σε αυτή τη περιοχή του ορυχείου, καθώς άλλες νεότερες κατακλύζονταν από ύδατα.

Την στιγμή όπου ολοκληρώθηκε η διάνοιξη της γεώτρησης, έντεκα (11) άτομα είχαν καταφέρει να επιζήσουν υπό συνθήκες συνεχών καταπτώσεων από την οροφή και τραυματισμένοι.

Στα πρώτα 40 m επιλέχθηκε γεώτρηση ξηρού τύπου με πεπιεσμένο αέρα διαμέτρου 52.2 cm, για τον λόγο ότι πιθανή εισροή νερού μπορούσε να οδηγήσει σε περαιτέρω καταρρεύσεις στη θέση όπου βρίσκονταν οι εγκλωβισμένοι εργάτες. Ύστερα από 14 μέρες από την στιγμή όπου σημειώθηκε το ατύχημα, οι έντεκα (11) εργάτες ανελκύστηκαν στην επιφάνεια με την χρήση της κάψουλας (Dahlbusch Bomb). Είκοσι εννιά (29) εργάτες έχασαν την ζωή τους, οι δεκαεννιά (19) εκ των οποίων πέθαναν ακαριαία την στιγμή του ατυχήματος και οι υπόλοιποι δέκα (10) τις επόμενες μέρες, κατά την αναμονή της διάσωσης τους..

1.3.3 ΟΡΥΧΕΙΟ QUEECREEK, Η.Π.Α., 2002

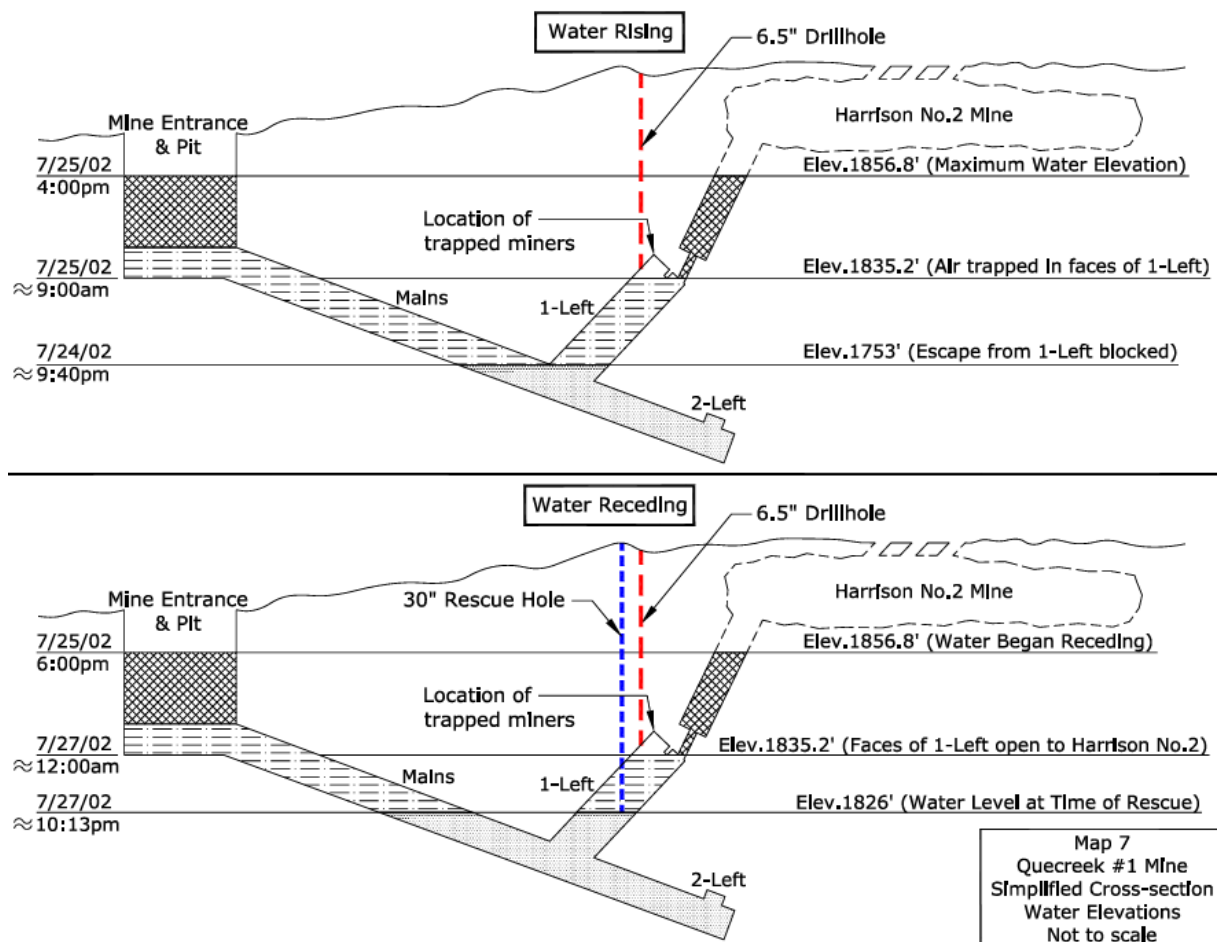
Το ανθρακωρυχείο Quecreek βρίσκεται στη Πενσυλβάνια, Η.Π.Α, ανήκει στην εταιρία Black Wolf Coal Company και είναι κατασκευασμένο με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Το ατύχημα συνέβη στις 24 Ιουλίου 2002 όταν εννιά (9) μεταλλωρύχοι εγκλωβίστηκαν για 77 ώρες (Johnson, 2003). Στο ορυχείο βρίσκονταν δύο ομάδες μεταλλωρύχων σε βάθος 75 m, όπου η κάθε μία απαρτιζόταν από εννιά άτομα. Η μία ομάδα διατάραξε κατά λάθος το τοίχωμα ενός γειτονικού ορυχείου, το οποίο ονομαζόταν Saxman Coal / Harrison #2 Mine, δεν ήταν υπό εκμετάλλευση, είχε εγκαταλειφθεί, και είχε πληρωθεί με νερό (Huber & Vandapel, 2006) (Εικόνα 1). Ως αποτέλεσμα αυτού του λάθους, εισήλθαν εντός των στοών περίπου 190 εκατ. λίτρα νερού (Zeng et al., 2009), και παγιδεύοντας την μία εκ των δύο ομάδων εντός του ορυχείου για τρεις ημέρες (Hu & McMechan, 2007).



Εικόνα 1. Ανάπτυξη των δύο γειτονικών ορυχείων Quecreek και Harrison, όπου υποδεικνύονται οι περιοχές εγκλωβισμού και οι περιοχές πληρωμένες με νερό (MSHA, 2002).

Τα δύο αυτά γειτονικά ορυχεία εκμεταλλεύονταν το ίδιο κοίτασμα άνθρακα, το οποίο ονομαζόταν Upper Kittaning, διέθετε πάχος 1-1.5 m και βρισκόταν σε αντίκλινο. Αξίζει να σημειωθεί ότι το γειτονικό ορυχείο Saxman Coal / Harrison #2 Mine υψομετρικά βρισκόταν ψηλότερα. Αμέσως μετά το λάθος της ομάδας των μεταλλωρύχων, ειδοποιήθηκε η άλλη ομάδα, η οποία όμως δεν πρόλαβε να διαφύγει, και το ορυχείο πλημμύρισε γρήγορα, καθώς το ύψος της υδροστατικής στήλης ήταν πολύ υψηλό και το τοίχωμα μεταξύ των δύο ορυχείων διέθετε μικρό πάχος (Gochioco et al., 2008). Οι εννιά μεταλλωρύχοι παγιδεύτηκαν εντός του ορυχείου για τρεις ημέρες (Tapia, 2002; Frank, 2002), χωρίς ωστόσο να χάσει κάποιος εργάτης την ζωή του (Gochioco, 2003). Η διατάραξη στο τοίχωμα όπου αποτελούσε το όριο μεταξύ των δύο ορυχείων οφείλεται σε έκρηξη αέριου μεθανίου, προκαλώντας αρχικά καθίζηση, διαταραχή της βραχομάζας και κατ' επέκταση είσοδο υδάτων από το εγκαταλειμμένο ορυχείο (A. Morris et al., 2006; Engström et al., 2017).

Καθώς οι είσοδοι στο ορυχείο είχαν ήδη αρχίσει να κατακλύζονται από νερό, οι επιχειρήσεις διάσωσης ξεκίνησαν κατευθείαν. Τόσο στην επιφάνεια πάνω από το ορυχείο, όσο και σε γεωτρήσεις γειτονικών περιοχών ξεκίνησε η άντληση νερού (Εικόνα 2), ενώ συγχρόνως οι ομάδες διάσωσης επικεντρώθηκαν στην χορήγηση οξυγόνου εντός του ορυχείου. Η γεώτρηση διανοίχθηκε στο σημείο όπου θεωρούνταν πως βρίσκονται οι μεταλλωρύχοι για την είσοδο οξυγόνου, καθώς υπήρχαν φόβοι για την υγεία τους λόγω της συγκέντρωσης τοξικών αερίων στον υπόγειο χώρο (Engström et al., 2017). Η διερευνητική γεώτρηση είχε διάμετρο 17 cm και χρειάστηκαν δύο ώρες για την ολοκλήρωση της διάνοιξης της μέχρι τον υπόγειο χώρο του ορυχείου, και οι εγκλωβισμένοι εργάτες έκρουσαν την κεφαλή του γεωτρύπανου ώστε να ακουστούν.



Εικόνα 2. Εγκάρσια τομή στο ορυχείο όπου απεικονίζονται χρονικά τα βασικά γεγονότα από το αρχικό συμβάν έως την επιτυχή διάσωση των μεταλλωρύχων (MSHA, 2002).

Κατόπιν παρότρυνσης ειδικού σε θέματα αερισμού της MSHA (Mine Safety and Health Administration), ξεκίνησε η δημιουργία ενός θύλακα αέρα υπό πίεση για την αποφυγή εισροής νερού στο χώρο όπου είχαν συγκεντρωθεί οι μεταλλωρύχοι. Παρόλα αυτά, με την δημιουργία του θύλακα αέρα ελλόχευαν κίνδυνοι προσωρινής απώλειας της ακοής λόγω υψηλού θορύβου και υψηλής πίεσης. Παρά τις συνεχείς αντλήσεις νερού από πολλαπλά σημεία για περισσότερο από 24 ώρες, η θέση όπου βρίσκονταν οι εννιά (9) μεταλλωρύχοι άρχισε να πλημμυρίζει, και αναγκάστηκαν να μεταβούν στο υψηλότερο σημείο του ορυχείου, αναμένοντας τις εξελίξεις της διάσωσης τους σε περιβάλλον όπου επικρατούσε θερμοκρασία 10° C.

Στις 25 Ιουλίου, την επόμενη μέρα από την οποία σημειώθηκε το ατύχημα, το μηχάνημα IR RD20 όπου θα χρησιμοποιούταν για την διάνοιξη της γεώτρησης και θα γινόταν η διάσωση, ήταν ήδη έτοιμο προς χρήση. Ο ρυθμός προχώρησης ήταν σημαντικά ταχύς, ωστόσο λόγω καταστροφής των κοπτικών της κεφαλής και έμφραξης τους εντός της γεώτρησης σημειώθηκε καθυστέρηση 18 ωρών.

Η κεφαλή του μηχανήματος αντικαταστάθηκε με νέα, και συνεχίστηκε η γεώτρηση έως ότου αποφασίστηκε η μείωση της διαμέτρου της (75 cm σε 66 cm) λόγω εκ νέου εμφάνισης προβλημάτων. Εντός της νέας διαμέτρου ήταν αναγκαίο να χωράει η κάψουλα διάσωσης (Εικόνα 3) των μεταλλωρύχων.

Κατά την διάσωση των εργατών είχε εκφραστεί ο κίνδυνος προσβολής τους από την ασθένεια της αποσυμπίεσης, λόγω διαφοράς ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια και εντός του ορυχείου. Ωστόσο, η διαφορά πίεσης αποδείχτηκε αμελητέα και δεν απαιτήθηκαν περαιτέρω ενέργειες αεροστεγούς κλεισίματος της γεώτρησης όπου θα γινόταν η διάσωση. Η διάσωση των εννιά (9) μεταλλωρύχων ολοκληρώθηκε στις 28 Ιουλίου, και με χρήση της κάψουλας ύψους 2.5 m οι εργάτες ανελκύστηκαν στην επιφάνεια.



Εικόνα 3. Η διάσωση ενός εκ των μεταλλωρύχων με την χρήση της κάψουλας (Queecreek Mine Rescue Site).

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε σχετικά με τα αίτια όπου προκάλεσαν το ατύχημα υπέδειξαν ότι η ομάδα των 9 εργατών διατάραξε το τοίχωμα με το γειτονικό ορυχείο εξαιτίας της ανακριβής χαρτογράφησης όπου είχε πραγματοποιηθεί και του μη επικαιροποιημένου χάρτη (Murphy et al., 2009). Η κατάσταση όπου βρισκόταν το γειτονικό ορυχείο πριν την ολοκλήρωση της εκμετάλλευσης δεν είχε αποτυπωθεί, και όπως αποδείχτηκε η χρήση ανακριβών χαρτών μπορεί να προκαλέσει τέτοια ατυχήματα (Thrun et al., 2004). Παράλληλα, το συμβάν αυτό αποδεικνύει την σημασία και την αναγκαιότητα να γίνεται συνεχώς χρήση των πιο αποτελεσματικών και ασφαλέστερων μεθόδων εκμετάλλευσης (Groves et al., 2007).

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα όπου αναδείχτηκαν κατά το ατύχημα στο ορυχείο Quecreek ήταν η αδυναμία εύκολης και αξιόπιστης ανίχνευσης των κενών, όπως το εγκαταλειμμένο γειτονικό ορυχείο (Ge et al., 2008). Η συγκέντρωση υπόγειων υδάτων μετά το πέρας της εκμετάλλευσης στα υπόγεια ορυχεία και η προστασία του υδροφόρου ορίζοντα δεν αποτελούσε ακόμα σημαντικό ζήτημα. Τα εγκαταλειμμένα ορυχεία συνήθως λειτουργούν ως υπόγειες δεξαμενές νερού.

Η συγκέντρωση αυτών των υδάτων είναι τις περισσότερες φορές είτε άγνωστη, είτε μη χαρτογραφημένη, είτε δεν εμφανίζει σημαντικό κίνδυνο μόλυνσης. Κατά συνέπεια, η ακριβής αποτύπωση του υπόγειου χώρου των ορυχείων μπορεί να μειώσει τις πιθανότητες να σημειωθεί κάποιο ατύχημα από πλημμύρα κατά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος (Ackman, 2003).

1.3.4 ΟΡΥΧΕΙΟ SAN JOSÉ, ΧΙΛΗ, 2010

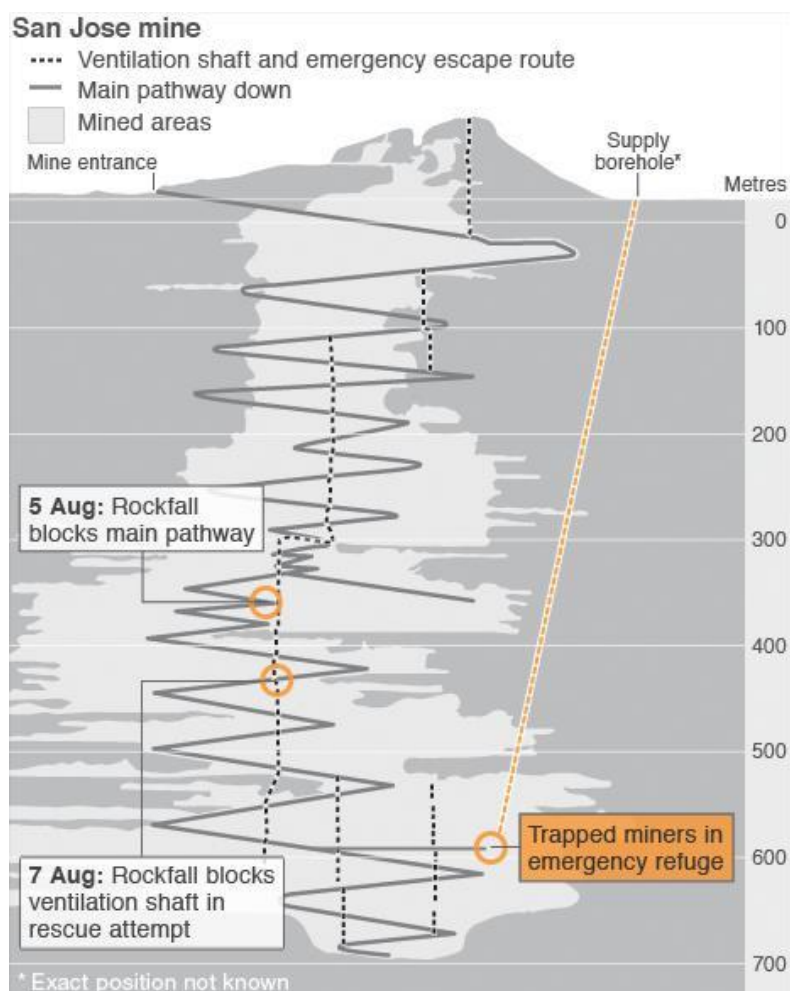
Το ατύχημα σημειώθηκε στο ορυχείο San José, το οποίο βρίσκεται 45 km βόρεια της πόλης Κοριάρό και 800 km βόρεια της πρωτεύουσας της Χιλής, Σαντιάγκο (Halдар, 2018). Το υπό εκμετάλλευση κοίτασμα είναι χαλκού-χρυσού, και βρίσκεται υπό εκμετάλλευση για περισσότερο από 100 χρόνια. Την διαχείριση του ορυχείου έχει αναλάβει η Χιλιανή εταιρεία San Esteban Mining Company, η οποία στο παρελθόν είχε απασχολήσει τις Αρχές για τη μη τήρηση των απαραίτητων μέτρων ασφαλείας, και την περίοδο μεταξύ 1998-2010 οχτώ (8) είχαν χάσει την ζωή τους στο San José. Παράλληλα, την περίοδο 2004-2010 η εταιρεία επιβαρύνθηκε 42 φορές με πρόστιμο για μη τήρηση των μέτρων ασφαλείας, ενώ το 2007 ο θάνατος ενός εργάτη επέφερε το προσωρινό κλείσιμο του ορυχείου. Λόγω χαμηλού κρατικού προϋπολογισμού, στην περιοχή της ερήμου Ατακάμα όπου βρίσκονταν υπό λειτουργία 884 ορυχεία, είχαν διορισθεί μόνο τρεις επιθεωρητές.

Η εταιρεία διαχειρίζεται αρκετά ορυχεία στην θέση αυτή, καθώς το ορυχείο συναντάται σε περιοχή πλούσια σε μέταλλευμα (Romero et al., 2012). Στην περιοχή αυτή επικρατεί διορίτης υψηλής αντοχής με ενστρώσεις κορεσμένης αργίλου σε ορισμένα σημεία. Χαρακτηριστικό του διορίτη είναι το φαινόμενο της σερικιτίωσης, κατά την οποία η αντοχή του μειώνεται σημαντικά. Η ζώνη εκμετάλλευσης περιέχει ασβεστίτη, και το δίκτυο ασυνεχειών καθορίζει σημαντικά την γεωτεχνική συμπεριφορά της βραχομάζας. Μεταξύ του διορίτη και της ζώνης εκμετάλλευσης εντοπίζεται ζώνη διάτμησης, με ένα κύριο και δευτερεύον ρήγμα. Το πάχος της ζώνης κυμαίνεται μεταξύ μερικών εκατοστών και δύο μέτρων. Επίσης, στην περιοχή του ορυχείου δεν έχει εντοπιστεί υδροφόρος ορίζοντας, ενώ κατά μήκος της ακτογραμμής του Ειρηνικού Ωκεανού σημειώνονται σεισμικές δονήσεις λόγω της τεκτονικής πλάκας Nazca, η οποία βυθίζεται κάτω από την τεκτονική πλάκα της Νοτίου Αμερικής.

Στις 5 Αυγούστου 2010, περίπου στις 14:00 κατέρρευσε η οροφή σε ένα σημαντικό τμήμα του ορυχείου, καταστρέφοντας κατά θέσεις την ελικοειδή κεκλιμένη ράμπα, η οποία παρείχε πρόσβαση σε όλα τα επίπεδα του ορυχείου (Εικόνα 4). Κατά συνέπεια, τριάντα τρεις (33) μεταλλωρύχοι εγκλωβίστηκαν σε βάθος 700 m κάτω από την επιφάνεια και σε απόσταση 5 km από την είσοδο του ορυχείου (Junginger, 2012). Οι μεταλλωρύχοι εργάζονταν σε μεγάλο βάθος, κάτω από το επίπεδο των +180 m, με αποτέλεσμα να μην κινδυνεύσουν άμεσα από την κατάρρευση της οροφής.

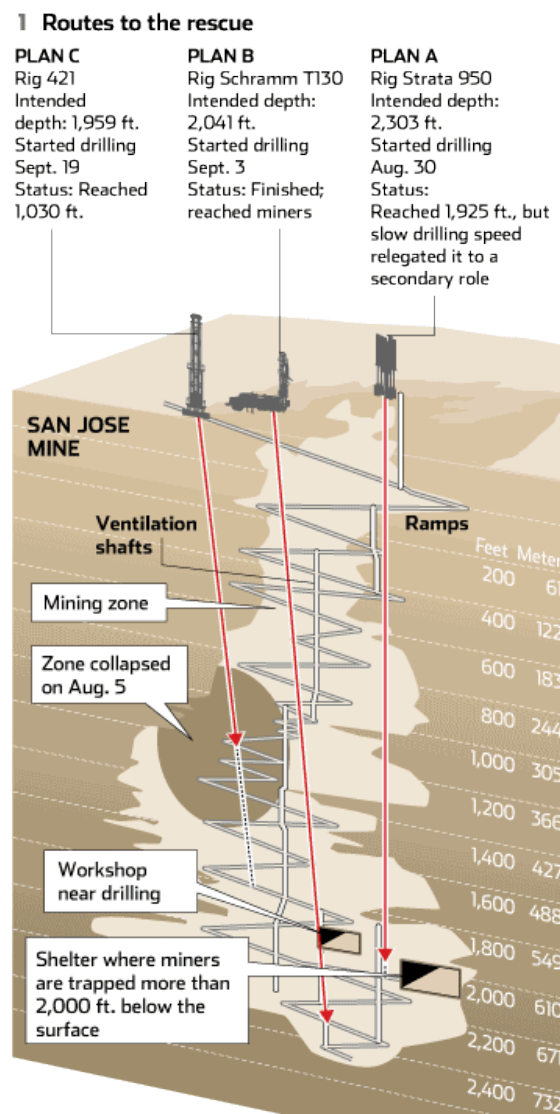
Σημαντικός παράγοντας στην εκδήλωση της αστοχίας ήταν η παλαιότητα του ορυχείου, τα ελλιπή και μη ορθώς συντηρημένα μέτρα υποστήριξης, όπως και οι αλλαγές στην μέθοδο εκμετάλλευσης του κοιτάσματος για βελτίωση της αποληψιμότητας. Η κατάρρευση της οροφής οφείλεται σε αστοχία rock-burst, κατά την οποία απελευθερώνεται ακαριαία ενέργεια, αποτελώντας χαρακτηριστική αστοχία σε περιοχές με σκληρά πετρώματα και μεγάλα βάθη όπου επικρατούν υψηλές τάσεις. Ένα παχύ στρώμα σκόνης, το οποίο προκλήθηκε από την εκρηκτική διάρρηξη του πετρώματος τύφλωσε τους παγιδευμένους μεταλλωρύχους για περίπου έξι ώρες.

Για την διάσωση των επιζώντων μελετήθηκε πληθώρα προτάσεων από τους υπεύθυνους ασφαλείας. Ύστερα από τον εντοπισμό των μεταλλωρύχων και την επικοινωνία με αυτούς 17 ημέρες μετά την εκδήλωση της αστοχίας (Andrews & Quintana, 2015; Selway, 2016), οι βασικότεροι παράγοντες όπου επηρέασαν την υιοθέτηση του τελικού σχεδίου διάσωσης ήταν ο χρόνος απεγκλωβισμού, το βάθος όπου ήταν σχετικά μεγάλο για την διάνοιξη της γεώτρησης με ακρίβεια και χωρίς αποκλίσεις, το κόστος της επιχείρησης και το ενδεχόμενο συμμετοχής των μεταλλωρύχων ως ένα βαθμό στον απεγκλωβισμό τους.



Εικόνα 4. Διάταξη της υπόγειας ανάπτυξης του ορυχείου (BBC News, 2010).

Ένα από τα μηχανήματα ανέλαβε την διεύρυνση μίας εκ των τριών ήδη υπάρχουσών γεωτρήσεων, οι οποίες προμήθευαν με εφόδια τους μεταλλωρύχους (Εικόνα 5). Το μηχάνημα είναι προσαρτημένο σε φορτηγό, και χρησιμοποιείται κυρίως για την διάνοιξη γεωτρήσεων σε βάθη έως και 1000 m. Το συνολικό μήκος διάτρησης ήταν 638 m υπό κλίση 82 °. Αρχικά, στη γεώτρηση όπου επιλέχθηκε η χρήση αυτού του μηχανήματος πραγματοποιήθηκε μία αρχική διεύρυνση από τα 13 cm στα 30 cm (First Reaming), και ύστερα μία δεύτερη διεύρυνση στη τελική διάμετρο της τάξεως των 66 cm. Η συμμετοχή των εγκλωβισμένων μεταλλωρύχων κρίθηκε απαραίτητη, οι οποίοι κλήθηκαν να μεταφέρουν περίπου 500 kg/hr εξορυσσόμενου υλικού.



Εικόνα 5. Τα τρία διαφορετικά σχέδια διάσωσης των εγκλωβισμένων μεταλλωρύχων (Twin Cities: Pioneer Press, 2010).

Παρά την φθορά των κοπτικών άκρων και την έμφραξη τους κατά την κοπή δομικών στοιχείων του ορυχείου, το μηχάνημα ξετρύπησε εντός 33 ημερών εντός του ορυχείου παρά την αρχική πρόβλεψη των 3 μηνών. Για την ανέλκυση των εργατών στην επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε κάψουλα διάσωσης, όπως και στις περιπτώσεις διάσωσης στο Lengede (1963) και το Quecreek (2002). Οι τρεις χαλύβδινες κάψουλες διάσωσης ονομάστηκαν Fenix 1, 2, 3 και ήταν εξοπλισμένες με απόθεμα οξυγόνου, εξοπλισμό για επικοινωνία με τους διασώστες και φωτισμό. Μετά το ατύχημα, οι μελέτες γύρω από τον σχεδιασμό καβουλών διάσωσης έχουν ξεκινήσει σε όλο και περισσότερες χώρες (Xi et al., 2017).

Στις 14 Οκτωβρίου, 69 ημέρες ύστερα από το ατύχημα, οι τριάντα τρεις (33) μεταλλωρύχοι ανελκύστηκαν με επιτυχία στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα να χαθεί καμία ανθρώπινη ζωή. Οι 69 ημέρες όπου εγκλωβίστηκαν οι εργάτες εντός του ορυχείου αποτελούν χρόνο ρεκόρ παραμονής εντός υπόγειου χώρου.

Η απουσία εξόδων διαφυγής, όπου μόνο η ελικοειδής κεκλιμένη ράμπα αποτελούσε την μοναδική έξοδο. Συγχρόνως, το φρέαρ αερισμού δεν ήταν εξοπλισμένο με σκάλα διαφυγής όπως προβλεπόταν από την νομοθεσία, ενώ θα μπορούσε να αποτελέσει παρά τον κίνδυνο κατάρρευσης έναν πιθανό τρόπο διαφυγής. Παράλληλα, η ηλικία του ορυχείου σε συνδυασμό με τις επανεκκινήσεις των εργασιών και την απουσία σταθερού πλάνου και μεθόδου εξόρυξης συντέλεσαν στην εκδήλωση της αστοχίας. Το μέγεθος του ορυχείου και η άμεση σύνδεση του με την παγκόσμια ζήτηση χρυσού και χαλκού οδήγησε στην απουσία μακροπρόθεσμου πλάνου εκμετάλλευσης.

1.3.5 ΟΡΥΧΕΙΟ ΑΜΥΝΤΑΙΟΥ, ΕΛΛΑΔΑ, 2017

Το ορυχείο εξόρυξης λιγνίτη ανοικτής εκμετάλλευσης του Αμυνταίου βρίσκεται στη Φλώρινα, στη βορειοδυτική Μακεδονία. Την διαχείριση του ορυχείου και του υπό εκμετάλλευση κοιτάσματος έχει αναλάβει η Δ.Ε.Η. ΑΕ (Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού). Το ατύχημα συνέβη στις 10 Ιουνίου 2017, όταν μέρος των πρανών του ορυχείου κατέρρευσαν και το μέγεθος της κατολισθήσας μάζας είχε έκταση 2 km σε πλάτος και 2.2 km σε μήκος. Η αστοχία εντοπίστηκε στη βάση ενός πρανούς ύψους 210 m, με αποτέλεσμα να κατολισθήσει μάζα περίπου 80 εκατ. m³, και κατά συνέπεια τον ενταφιασμό 25 εκατ. τόνων εκμεταλλεύσιμου λιγνίτη. Παράλληλα, πέρα από την κατάρρευση όπου σημειώθηκε στο χώρο του ορυχείου, οι οικισμοί πλησίον του ορυχείου επηρεάστηκαν εξίσου σημαντικά από το ατύχημα, καθώς επίσης και το δίκτυο πρόσβασης και μεταφορών του ορυχείου (Εικόνα 6).

Επίσης, οι τέσσερις καδοφόροι εκσκαφείς του ορυχείου καταστράφηκαν εντελώς ή υπέστησαν σοβαρές ζημιές, ενώ μικρότερα φορτηγά, εκσκαφείς και εκατοντάδες μέτρα του ταινιοδρόμου μεταφοράς θάφτηκαν από την κατολίσθησα μάζα. Ακόμα, η μονάδα επεξεργασίας λυμάτων του οικισμού Ανάργυροι κατέρρευσε, ενώ σημαντικές ζημιές σημειώθηκαν σε κτίρια, υποδομές και τμήμα του οδικού δικτύου πλησίον της περιοχής του ορυχείου.



Εικόνα 6. Αποψη της καταστροφής του οδικού δικτύου όπου υπέστη ο οικισμός Αναργύρων (Loupasakis, 2020).

Αναφορικά με τα αίτια πρόκλησης του ατυχήματος, λήφθηκαν υπόψιν η επίδραση της τεκτονικής στην περιοχή, η πίεση των πόρων των υπόγειων υδάτων, και η γεωμετρία των υπό εκμετάλλευση πρανών του ορυχείου.

Αρχικά, δύο εκ των τριών ενεργών ρηγμάτων όπου έχουν χαρτογραφηθεί στην υπολεκάνη του Αμυνταίου, το ρήγμα των Αναργύρων και το ρήγμα της Βεγορίτιδα, έχουν εντοπιστεί εντός της ανοικτής εκσκαφής, στην περίμετρο της κατολισθήσας μάζας, αποτελώντας επίπεδα με μειωμένη διατμητική αντοχή. Αντίστοιχα, παραμορφώσεις στο οδικό δίκτυο είχαν εντοπισθεί και στον οικισμό Ανάργυροι αρκετούς μήνες πριν σημειωθεί η αστοχία, όπου τα ρήγματα καθόρισαν την θέση των επιφανειακών ρωγμών. Οι επιφανειακές αυτές ρωγμές παρατηρήθηκε ότι σχηματίστηκαν σύμφωνα με άλλες προϋπάρχουσες. Παρόλα αυτά, οι τεκτονικές συνθήκες της περιοχής δεν θεωρείται ότι αποτελούν τον γενεσιουργό παράγοντα της κατολίσθησης, παρά το γεγονός ότι ο τεκτονικός ιστός οριοθέτησε την γεωμετρία της αστοχίας.

Αντίθετα, η επίδραση της πίεσης πόρων των υπογείων υδάτων θεωρείται ότι διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην εκδήλωση της αστοχίας. Ο υδροφόρος ορίζοντας όπου αναπτύσσεται εντός των Νεογενών αποθέσεων της περιοχής έχει συστηματικά υπερεκμεταλλευτεί για την προστασία των πρानών, παρά το γεγονός ότι η ένταση των αντλητικών δραστηριοτήτων δεν ήταν πάντοτε σταθερή (Dimitrakopoulos and Koumantakis, 2017). Η συστηματική άντληση υδάτων είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών και τη ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Κατά αυτό τον τρόπο, οι ανάγκες για έργα αποστράγγισης εντός του κώνου ταπείνωσης ήταν μειωμένες.

Παρόλα αυτά, λόγω των παρατηρούμενων καθιζήσεων στον οικισμό Αναργύρων, στις αρχές του 2016 οι αντλητικές δραστηριότητες σταμάτησαν τελείως. Ωστόσο, η μεταβολή αυτή επηρέασε σημαντικά την ευστάθεια των πρानών. Στο νοτιοανατολικό τμήμα της εκσκαφής μόλις σημειώθηκε η αστοχία, άρχισε να διαφεύγει νερό από το φρύδι της αστοχίας, καθώς η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ήταν αρκετά υψηλή και τα υπόγεια ύδατα είχαν επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες των τεταρτογενών αποθέσεων στα υπό εκμετάλλευση πρानή. Από την άλλη πλευρά, στο βορειοδυτικό τμήμα της εκσκαφής υπήρχαν φρεάτια βαθιάς αποστράγγισης (Εικόνα 7). Τέλος, πιεζομετρικά φορτία μεταφέρθηκαν από τον καρστικό υδροφόρο στους Νεογενείς σχηματισμούς του χαμηλότερου επιπέδου της εκσκαφής, και επηρέασαν αρνητικά την ευστάθεια των πρानών.

Τέλος, όσον αφορά τον σχεδιασμό της ανοικτής εκσκαφής και των υπό εκμετάλλευση πρानών παρατηρήθηκε ανομοιογενής εκμετάλλευση, ανάλογα με τις ανάγκες της παραγωγής. Συνεπώς, ιδιαίτερη προσοχή είχε δοθεί στην εκμετάλλευση των κατώτερων βαθμίδων, και είχε παραμεληθεί η εκσκαφή των ενδιάμεσων όπου εντοπίζονταν οι Νεογενείς αποθέσεις.



Εικόνα 7. Αποψη του βορειοδυτικού τμήματος της εκσκαφής, στο οποίο παρατηρείται απουσία υδάτων εξαιτίας των αποστραγγιστικών έργων (Loupasakis, 2020).

Συμπερασματικά, τα κυριότερα αίτια πρόκλησης της κατολίσθησης ήταν η παρουσία ρηγμάτων και ζωνών διάτμησης εντός των Νεογενών αποθέσεων, τα αυξημένα πιεζομετρικά φορτία από τον καρστικό υδροφόρο κάτω από την υπόγεια εκσκαφή, και κατ' επέκταση οι πιέσεις πόρων όπου αναπτύχθηκαν εντός του υδροφόρου ορίζοντα των Τεταρτογενών αποθέσεων (Loupasakis, 2020).

1.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΑ ΑΙΤΙΑ ΠΡΟΚΛΗΣΗΣ ΤΩΝ ΑΤΥΧΗΜΑΤΩΝ

Κοινό χαρακτηριστικό της πλειοψηφίας των ατυχημάτων όπου αναλύθηκαν, ιδίως αυτών όπου σημειώθηκαν την περίοδο μεταξύ των ετών 1900-1975 είναι το πρώιμο στάδιο σχετικά με τους κανονισμούς ασφαλείας ενός ορυχείου και η περιορισμένη γνώση γύρω από την διάνοιξη στοών. Τα παραπάνω είχαν ως αποτέλεσμα, τόσο να σημειωθούν λάθη κατά την διάρκεια της λειτουργίας του ορυχείου όπως η λανθασμένη διαστασιολόγηση των μέτρων υποστήριξης και η έλλειψη γνώσης γύρω από την ορθή χρήση των εκρηκτικών υλών, όσο και κατά την διάρκεια της εκκένωσης ύστερα από την εκδήλωση ενός ατυχήματος.

Αρκετός αριθμός ατυχημάτων όπου αναλύθηκαν έχουν σημειωθεί σε χώρες, οι οποίες διέθεταν ισχυρή μεταλλευτική βιομηχανία, όμως η ασφάλεια και η υγεία των εργατών δεν λαμβανόταν σοβαρά υπόψη. Στο παρελθόν, οι συνθήκες εργασίες στα ορυχεία ήταν εξαντλητικές, όπου το περιβάλλον και η ποιότητα του αέρα ήταν βλαβερά για την υγεία του εργάτη. Ακόμη, στο πρώτο μισό του 20ου αιώνα τα μεταλλεία και τα ορυχεία ήταν χώροι εργασίας για τα κατωτέρα κοινωνικά στρώματα, για μετανάστες και πρώην κατάδικους. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις η παραγωγή του ορυχείου βασιζόταν σχεδόν εξ' ολοκλήρου στην ανθρώπινη δουλειά, όπως το καθεστώς άπαρτχαιντ στη Νότια Αφρική, και την εκμετάλλευση αιχμαλώτων πολέμου (Ορυχείο Mitsui Miike, Ιαπωνία).

Σε αρκετές χώρες η κατάσταση εξακολουθεί να παραμένει ιδιαίτερη επικίνδυνη για τους εργάτες, με υψηλά ποσοστά ατυχημάτων ετησίως όπως η Νότια Αφρική και η Κίνα. Παρόλα αυτά, το γεγονός ότι η καθημερινή εργασία των μεταλλωρύχων αποτελεί την σημαντικότερη πηγή του ορυχείου είναι αδιαμφισβήτητη (Saleh & Cummings, 2011b). Πληθώρα μελετών και ερευνών αφορά τους περιβαλλοντικούς προβληματισμούς γύρω από την μεταλλευτική βιομηχανία (Coetzee & Van Staden, 2011), ωστόσο λίγες είναι οι αναφορές σχετικά με το αντίκτυπο των ατυχημάτων σε κοινωνικό επίπεδο (Deegan et al., 2000; Cho, 2009).

Στον 21ο αιώνα, η απόκτηση τεχνογνωσίας, η βελτίωση των δυνατοτήτων του μηχανικού εξοπλισμού στα ορυχεία και η θέσπιση κανονισμών έχει επιφέρει αύξηση της ασφάλειας στη μεταλλευτική βιομηχανία, χωρίς όμως την πλήρη εξάλειψη και τον εκμηδενισμό του κινδύνου εκδήλωσης ενός ατυχήματος. Οι μεγάλες μεταλλευτικές εταιρείες λαμβάνουν υπόψη σε μεγαλύτερο βαθμό τις επιπτώσεις της μεταλλευτικής στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον.

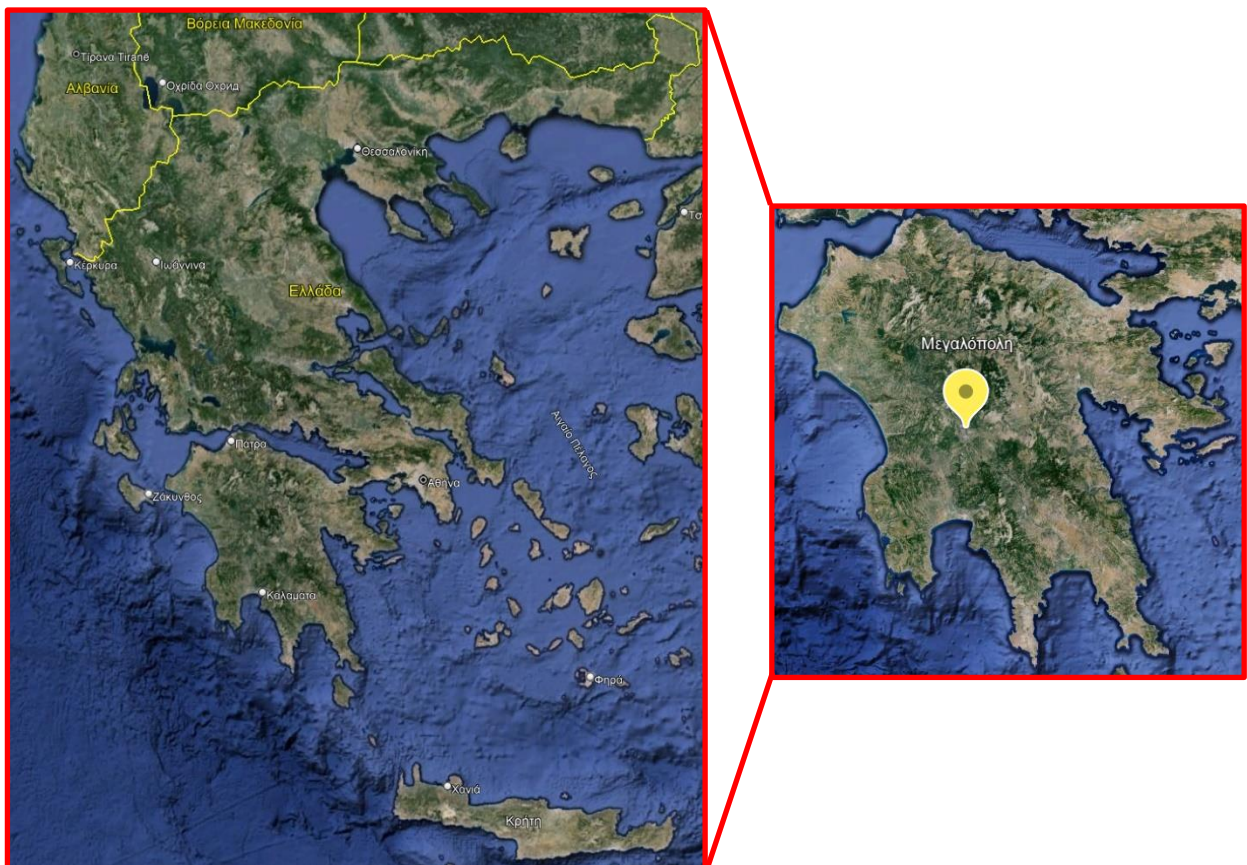
2 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ, ΓΕΩΛΟΓΙΑ, ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ, ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά η μορφολογία και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, χαρακτηριστικά απαραίτητα για την κατανόηση του περιβάλλοντος όπου βασίστηκαν οι αριθμητικές αναλύσεις του τέταρτου κεφαλαίου. Τέλος, αναλύονται οι υδρολιθολογικές συνθήκες όπου επικρατούν στην λεκάνη της Μεγαλόπολης και γίνεται αξιολόγηση των σχηματισμών με βάση την υδροπερατότητα τους.

2.2 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Τα ορυχεία της Μεγαλόπολης βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα της Πελοποννήσου και ανήκουν διοικητικά στο νομό Αρκαδίας (Εικόνα 8). Η Μεγαλόπολη αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ενεργειακά κέντρα της Ελλάδας και η συστηματική αξιοποίηση των κοιτασμάτων λιγνίτης της περιοχής από την Δ.Ε.Η. ξεκίνησε την δεκαετία του 1970.



Εικόνα 8. Ευρύτερη περιοχή μελέτης (Μεγαλόπολη).

Η Μεγαλόπολη αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης διάφορους ερευνητές στο παρελθόν, οι οποίοι έχουν ασχοληθεί με την γεωμορφολογική, την λιθολογική και στρωματογραφική ερμηνεία της περιοχής (Lüttig and Marinos 1962, Gold 1963, Lönhert and Nowak 1965, Vinken 1965, Hiltermann and Lüttig 1969, Αθανασίου κ.ά. 1972 και αναφορές, Καπερώνης κ.ά. 1974).

Το οροπέδιο της Μεγαλόπολης εντοπίζεται σε μέσο υψόμετρο 300 m έως 500 m και περιορίζεται από το όρος Ταΰγετος Νότια, από το όρος Μαίναλο στα Βόρεια, από τα όρη Λύκαιο και Τενάδιο στα Δυτικά, και από χαμηλότερους ορεινούς όγκους στα Ανατολικά.

Το μέσο υψόμετρο της λεκάνης ανέρχεται στα 400 m (Νικολάου, κ.ά., 2008), ενώ η υψομετρική διαφορά με τα περιβάλλοντα όρη είναι περίπου 200 έως 400 m. Η συνολική έκταση της λεκάνης της Μεγαλόπολης υπολογίζεται στα 180 km² έως 200 km², και ο μέγιστος άξονας της στα 18 km με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ (Μαρίνος κ.ά. 1959). Το ανάγλυφο της είναι ομαλό, με ορισμένες εμφανίσεις εξάρσεων όπως μικροί λόφοι. Γενικότερα, η περιοχή χαρακτηρίζεται από χαμηλές τιμές μορφολογικών κλίσεων της τάξεως των 0 έως 0.5%.

Η αποστράγγιση της λεκάνης επιτυγχάνεται με φυσικό τρόπο, χάρη στο υδρολογικό σύστημα του ποταμού Αλφειού και των παραπόταμων του. Κύριοι παραπόταμοι του ποταμού Αλφειού είναι ο Ελισσώνας, η Ξερίλα, η Γουδάνη και η Λαγκάδα. Η συνολική περιοχή όπου αποστραγγίζεται από το παραπάνω σύστημα είναι περίπου 636 km². Οι πηγές του Αλφειού ξεκινούν από τα νοτιοανατολικά όρια της λεκάνης με υψόμετρο 383 m, ανατολικά του υψώματος Λεονταρίου. Στην συνέχεια, ο ποταμός διασχίζει κατά μήκος τη λεκάνη κοντά στο δυτικό της όριο. Συνεπώς, διέρχεται από την περιοχή της Καρύταινας δια μέσου στενής κοιλάδας σε υψόμετρο 322 m και παρουσιάζει υψομετρική πτώση της τάξεως των 60 m κατά των μήκος των 22 km όπου καταλαμβάνει. Ο ποταμός Αλφειός και οι παραπόταμοι του είναι υπεύθυνοι για τον σχηματισμό γεωμορφών πέριξ της λεκάνης, όπως ποτάμιες αναβαθμίδες ηλικίας Μέσου-Ανωτέρου Πλειστοκαίνου-Ολοκαίνου και μικρών φαραγγιών.

2.2.1 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Το δημοτικό διαμέρισμα Χωρέμης ανήκει διοικητικά στο δήμο Μεγαλόπολης, και εντοπίζεται σε απόσταση περίπου 5 km ΝΔ της ομώνυμης πόλης. Ο δήμος Μεγαλόπολης εντοπίζεται στη λεκάνη Μεγαλόπολης στη Κεντρική Πελοπόννησο.

Η οικιστική ανάπτυξη του δημοτικού διαμερίσματος συναντάται σε μία λοφώδη περιοχή, η οποία καλύπτεται περιμετρικά από πρανή. Γενικά, τα τεχνητά και φυσικά πρανή όπου εντοπίζονται στη περιοχή παρουσιάζουν χαμηλές μορφολογικές κλίσεις, της τάξεως των 5-10°, και σε ορισμένα σημεία μεγαλύτερες λόγω της εκτροπής του Αλφειού ποταμού. Από τη δεκαετία του 1970 και έπειτα, η κοινότητα Χωρέμης βρίσκεται δυτικά της όχθης του ποταμού, καθώς η εκτροπή του ποταμού πραγματοποιήθηκε σε μεγάλο βαθμό λόγω της εκμετάλλευσης λιγνίτη ανατολικά και της κατασκευής του υδροηλεκτρικού σταθμού στη περιοχή του Λάδωνα (Εικόνα 9).



Εικόνα 9. Δορυφορική εικόνα (Google Earth) όπου εντοπίζεται το Δημοτικό Διαμέρισμα Χωρέμη, η νέα κοίτη του ποταμού Αλφειού και το λιγνιτωρυχείο Μεγαλόπολης.

Όσον αφορά την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου στην περιοχή της κοινότητας, εντοπίζονται κλάδοι του δικτύου τόσο βόρεια, όσο και νότια της οικιστικής ανάπτυξης. Η νέα κοίτη λόγω της εκτροπής εντοπίζεται σε απόσταση περίπου 200 m από το ανατολικό άκρο των οικισμών (Εικόνα 10).



Εικόνα 10. Αποψη της περιοχής Χωρέμη και της νέας κοίτης του Αλφειού Ποταμού ύστερα από την εκτροπή του.

Οι περιοχές όπου βρίσκονται στο Μεσογειακό χώρο εμφανίζουν έναν τύπο κλίματος, ο οποίος καλείται Μεσογειακό κλίμα (Gasith & Resh, 1999b). Συνήθως, το κλίμα στις περιοχές αυτές χαρακτηρίζεται από ήπιους, βροχερούς χειμώνες και θερμά, ξηρά καλοκαίρια (Aschmann, 1973). Η κοντινή απόσταση από την θάλασσα επιδρά στην διατήρηση της θερμοκρασίας, σε σχετικά σταθερά επίπεδα, ενώ οι τοπογραφικές εξάρσεις και περιοχές σε μεγαλύτερα υψόμετρα χαρακτηρίζονται από χαμηλότερες θερμοκρασίες (Dell et al., 1989). Η περιοδικότητα των βροχοπτώσεων και η διακύμανση της έντασης αυτών αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του τύπου κλίματος.

Ο κύριος όγκος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (65-80%) σημειώνεται κατά την περίοδο των τριών μηνών του χειμώνα, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις προκαλούνται πλημμυρικά φαινόμενα λόγω της σφοδρότητας των βροχοπτώσεων (Nahal, 1981; Lulla, 2006; Ηουέρου, 2013). Συνεπώς, στην περιοχή μελέτης επικρατεί Μεσογειακός τύπος κλίματος, με υψηλή ηλιοφάνεια καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής για την ευρύτερη περιοχής μελέτης εκτιμάται 800-1000 mm βάσει εκτιμήσεων όπου πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν (O. Gold, 1962), όπως και μεταγενέστερων μετρήσεων όπου πραγματοποιήθηκαν από περισσότερους μετεωρολογικούς σταθμούς και από σταθμός εντός λιγνιτωρυχείου (Πίνακας 5). Οι τρεις μετεωρολογικοί σταθμοί, όπου βρίσκονται κοντά στην περιοχή του ορυχείου Μεγαλόπολης είναι οι σταθμοί Καρύταινας, Ζώνης, ΑΗΣ Μεγαλόπολης. Ο τέταρτος σταθμός βρίσκεται εντός του ορυχείου. Για την περίοδο μεταξύ 1976-1991 όπου οι τρεις σταθμοί βρίσκονταν ταυτόχρονα σε λειτουργία, η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 919 mm για τον σταθμό της Καρύταινας, 944 mm Ζώνης, 899mm για τον σταθμό Α.Η.Σ. Μεγαλόπολης και 837 mm για τον σταθμό όπου έχει εγκατασταθεί εντός του ορυχείου (Δημητρακοπούλου, 2011). Αντίστοιχα, στη περιοχή του Βαμβακού η μέση ετήσια βροχόπτωση δεν ξεπερνάει τα 550 mm.

Πίνακας 5. Μετεωρολογικοί σταθμοί της ευρύτερης περιοχής Μεγαλόπολης.

ΟΝΟΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΝΟΜΟΣ-ΕΠΑΡΧΙΑ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΜΗΚΟΣ	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟ ΠΛΑΤΟΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ
Ορυχείο	Αρκαδία-Γορτυνία			
ΑΗΣ Μεγαλόπολης	Αρκαδία-Γορτυνία	22° 08'	37° 23'	430 m
Ζώνη	Αρκαδία-Γορτυνία	22° 07'	37° 28'	510 m
Καρύταινα	Αρκαδία-Γορτυνία	22° 02'	37° 29'	490 m

Σύμφωνα με τα στοιχεία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) η μέση θερμοκρασία της περιοχής μελέτης είναι περίπου 18 °C, η απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία 41.4 °C, η μέση μέγιστη 31.7 °C, η απόλυτη ελάχιστη -2.2 °C και η μέση ελάχιστη 7 °C. Η θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 20 °C και 31 °C τους θερινούς μήνες, ενώ το χειμώνα μεταξύ 6 °C και 13 °C. Ο θερμότερος μήνας τους έτους είναι ο Ιούλιος και ο πλέον ψυχρός ο Ιανουάριος. Αξίζει να σημειωθεί ότι ουσιαστική αναπλήρωση των υδάτων των υπόγειων υδροφόρων πραγματοποιείται κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο όπου εμφανίζουν μέση μηνιαία βροχόπτωση

άνω των 80 mm. Αντίθετα, κατά την περίοδο του θερινών μηνών το μέσο μηνιαίο ύψος βροχής δεν ξεπερνά τα 20-25 mm και επικρατεί σχεδόν ανομβρία.

Όσον αφορά τους ανέμους, η επικρατέστερες διευθύνσεις είναι ΒΔ και ΒΒΔ, κατά τους θερινούς μήνες και την άνοιξη. Κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών επικρατούν άνεμοι ανατολικής διεύθυνσης. Οι τιμές έντασης του ανέμου δεν ξεπερνούν τα 3 Beaufort, ενώ συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 1-2.

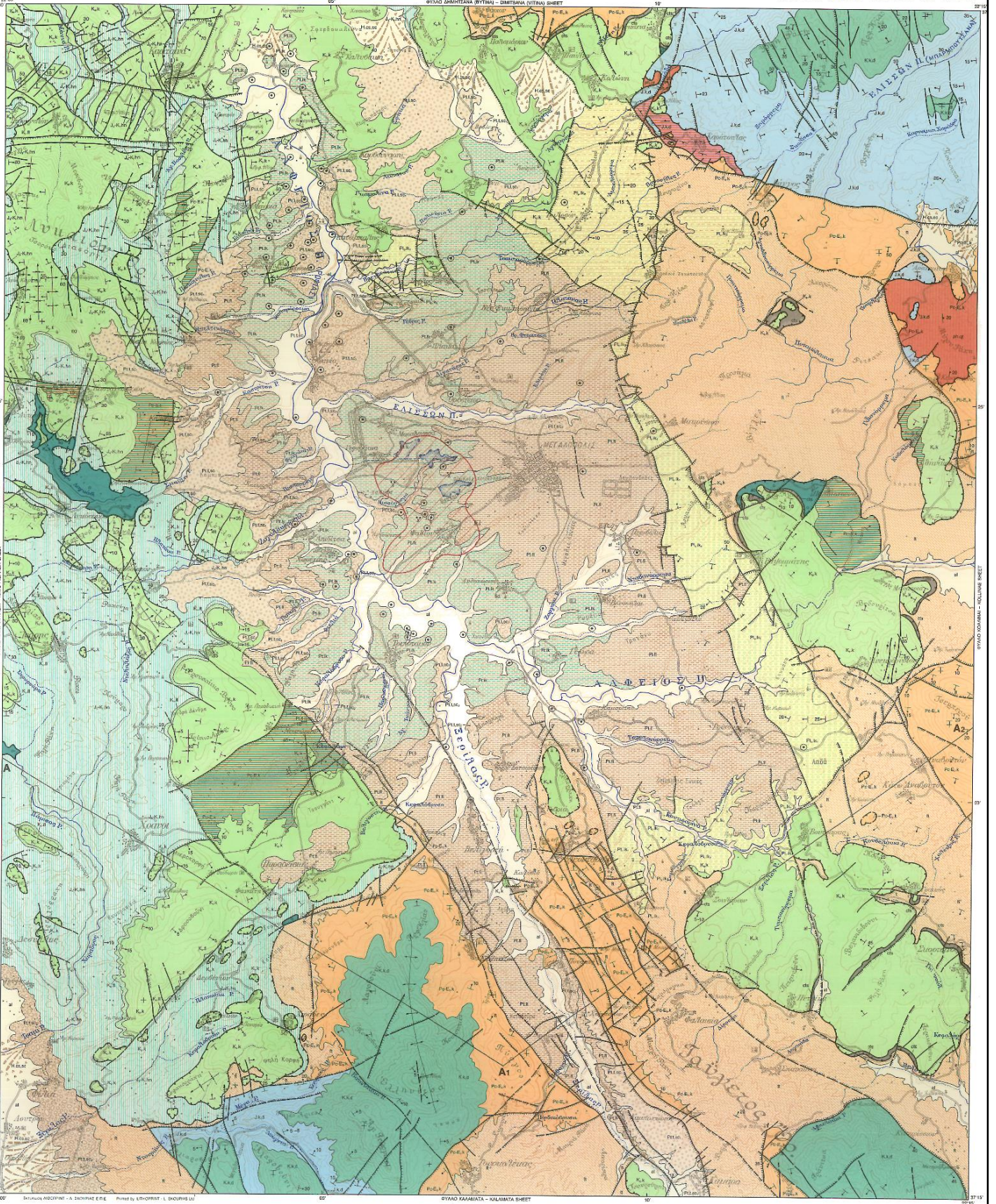
Τέλος, η ευρύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλά επίπεδα υγρασίας κατά την διάρκεια του έτους. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται κατά την διάρκεια της ψυχρής περιόδου, ενώ τους θερινούς μήνες οι τιμές αυτές μειώνονται. Η μέση σχετική υγρασία αέρα από το έτος 1971 και ύστερα ανέρχεται σε περίπου 70%.

2.3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι ορεινοί όγκοι όπου περιβάλλουν τη λεκάνη της Μεγαλόπολης, καθώς και το υπόβαθρο της αποτελείται από σχηματισμούς του αυτόχθονου υποβάθρου της Πελοποννήσου, με τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα των στρωμάτων Τυρού, και από σχηματισμούς των γεωτεκτονικών ενοτήτων Ωλονού-Πίνδου και Γαβρόβου-Τριπόλεως. Η λεκάνη με τη μορφή ενός τεκτονικού βυθίσματος, αποτελεί απόρροια της μετα-αλπικής τεκτονικής δραστηριότητας όπου σημειώθηκε στην Πελοπόννησο, μεταξύ Ολιγοκαίνου και Ανώτερου Πλειοκαίνου (Μαρίνος κ.ά. 1959, Vinken 1965), ακολουθώντας την Ηωκαινική φάση συμπίεσης των αλπικών πτυχώσεων. Μέσα στο τεκτονικό βύθισμα αποτέθηκαν μεταγενέστερα ιζήματα ποτάμιας και λιμναίας φάσης, ανάλογα με τις συνθήκες όπου επικρατούσαν κάθε φορά στην περιοχή.

Η λιγνιτοφόρα λεκάνη της Μεγαλόπολης συνιστά μια ενδο-ορεινή μεταλπική δομή, όπου η δημιουργία της οφείλεται στις επικρατούσες εφελκυστικές τάσεις της περιοχής. Η ενδο-ορεινή λεκάνη της Μεγαλόπολης συνιστά μέρος του ενεργά εκτεταμένου Ελληνικού τόξου, αποτελώντας μία τεκτονική τάφρο.

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των λιθολογικών και στρωματογραφικών χαρακτηριστικών των ιζημάτων και των σχηματισμών, τα οποία δομούν το υπόβαθρο της λεκάνης, σύμφωνα με τους Vinken (1965) και Hiltermann und Lüttig (1969). Στην Εικόνα 11 διακρίνεται ο λεπτομερής γεωλογικός χάρτης της λεκάνης και των περιθωρίων της.



Εικόνα 11. Απόσπασμα από γεωλογικό χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Μεγαλόπολη (ΙΓΜΕ, 1997).

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

ΟΛΟΚΑΙΝΟ

Προσυμμεγείς αποθέσεις (al): από ασύνδετα αργιλοαμμόδη υλικά, χαλίκια και κροκάλες στις κοίτες των ποταμών και των χειμάρρων καθώς και μικρές αναβαθμίσεις.
Σύγχρονοι και παλαιοί κώνες κορημάτων, πλευρική κορημάδα (H.Cs.Sc): υλός, πλευρικοί ηηλοί με κορημάδα, χαλαρά κροκαλοπηγή.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

Σχηματισμοί Θυακίας-Ποταμία: ασύστημα αναβαθμιζών αδιείρητο, υλός, άργιλοι, άμμοι, χαλαρά κροκαλοπηγή και πλευρική κορημάδα.
Πάχος: 10 έως 40m περίπου.

Σχηματισμοί Χωρθέη

Στρώματα Μαραθούσας: εναλλαγές μαργών, αργίλων, χουμοειδών αργίλων και λιγνιτικών στρωμάτων με παρεμβολές λεπτομερών άμμων και φακοειδών διαστρώσεων χαλαρών κροκαλοπηγών λιμναίας φύσης.
Τα λιγνιτοφόρα στρώματα απορριζώνονται προς τα περιθώρια της λεκάνης όπου επικρατούν ποτάμιες αποθέσεις. Η οριοθέτηση της λιμναίας-ποτάμιας φύσης τόσο στην οριζόντια όσο και στην κάθετη εξέλιξη των σχηματισμών δεν είναι σταθερή.

Απολιθώματα: Ελασματοβράγχια:

Γαστερόποδα:

Οστρακόδμη:

Χαρόφυτα:

Προβοσκιδωτά:

Στρώματα Μεγαλόπολης: εναλλαγές μαργών, αργίλων, άμμων και ελαφρά συνεκτικών κροκαλοπηγών ποτάμιας φύσης. Αποτελούν την περιθωριακή βάση και πλευρική μετάβαση των στρωμάτων Μαραθούσας. Στα νότια επικρατούν με γενιάδη ασυμφωμία (5°-15°) πάνω στη βαθμίδα του Μακρυσιού.

Συνολικό πάχος των σχηματισμών Χωρθέη: 200m.

Σχηματισμός Απιδίας: εναλλαγές ερυθρών αργιλο-αμμοχών στρωμάτων με ελαφρά συνεκτικά κροκαλοπηγή και πλευρική κορημάδα με ερυθρές αργίλους.
Πάχος: 50 έως 100m.

ΝΕΟΓΕΝΕΣ

ΑΝΩΤΕΡΟ ΠΛΕΙΟΚΑΙΝΟ

Σχηματισμός Τριλόφου: άργιλοι, μάργες λιμναίας φύσης με παρεμβολές ελαφρά συνεκτικών κροκαλοπηγών στο ανώτερο τμήμα της βαθμίδας καθώς και ποτάμιας αποθέσεως με εναλλαγές αργίλων, μαργών, άμμων, ελαφρά συνεκτικών κροκαλοπηγών με διαστρωματώμενες στρώσεις. Πιθανώς οι αποθέσεις της βαθμίδας Τριλόφου να αποτελούν την πλευρική μετάβαση της βαθμίδας Μακρυσιού.

Σχηματισμός Μακρυσιού: άργιλοι, μάργες λιμναίας φύσης, με εναλλαγές κυρίως λιγνιτικών ενστρώσεων πάχους λίγων mm και κροκαλοπηγή. Τοπικά παρεμβάλλονται λιγνιτικά στρώματα πάχους 0,20 έως 1m όπως στην περιοχή Μακρυσιού.

Απολιθώματα: Ελασματοβράγχια:

Γαστερόποδα:

Οστρακόδμη:

Συνολικό πάχος των σχηματισμών: 60 έως 120m.

ΖΩΝΗ ΠΙΝΔΟΥ

ΠΑΛΑΙΟΓΕΝΕΣ

ΠΑΛΑΙΟΚΑΙΝΟ – ΗΣΚΑΙΝΟ (?)

Στρώματα μετάβασης του flysch: εναλλαγές λεπτοπλακωδών έως στρωματωδών μικριτικών-βιομικριτικών πελαγικών σβεστωλίθων με ενστρώσεις ή κονδύλους πυριτολίθων και μαργαλιών σβεστωλίθων, ερυθρών μαργών στο κατώτερο τμήμα. Προς τα πάνω μεταπίπτουν στα κλάσματα του flysch με μαργαλιούς ή λατυποπηγείς σβεστωλίθους, εναλλαγές αργιλοάμων, ψαμμοάμων και ομπηγών φαμμιτών (π.χ. Πολιοχούνη).

Απολιθώματα:

Πάχος: 0-50m.

ΑΝΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

ΤΟΥΡΩΝΙΟ – ΜΑΙΣΤΡΗΧΤΙΟ

Ασβεστολίθοι: πλακόεδροι έως στρωματοειδείς, πολύχρωμοι, μικριτική ή βιομικριτική πελαγική φύσης με ενστρώσεις ή κονδύλους ερυθρών-μαύρων πυριτολίθων. Στα ανώτερα μέρη εμφανίζονται μαργαλιώδη παρεμβάλλονται ερυθροί ηηλίτες, φαμμίτες και μικροκλαστικοί σβεστωλίθοι.

Απολιθώματα:

Ηλικία: Μαιστρήχτιο.

Ηλικία: Σαντόνιο-Μαιστρήχτιο.

Ηλικία: Τουρώνιο-Κονιαίο.

Πάχος: 150-200m.

ΚΕΝΟΜΑΝΙΟ – ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΤΟΥΡΩΝΙΟ

Πρώτος flysch: κλαστική σειρά καστανόχρωμη ή πρασινών λεπτοαδρόκοκκων φαμμιτών με ενστρώσεις ή παρεμβολές ερυθρών μαργών, μαργαλιών σβεστωλίθων και μικροκλαστικών μικρολατυποπηγών σβεστωλίθων. Στα μεσατικά στρώματα προς τους ανακηρτιδικούς σβεστωλίθους εμφανίζονται εναλλαγές λεπτόκοκκων φαμμιτών, μαργαλιών σβεστωλίθων και μικροκλαστικών-μικριτικών σβεστωλίθων.

Απολιθώματα:

Σε λατινικές μικρολατυποπηγών:

Πάχος: 0 έως 100m.

ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ – ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

Κερατολίθη σειρά: πολύχρωμοι κυρίως ραδιολαρτες σε εναλλαγές με λεπτόκοκκους φαμμίτες στο κατώτερο τμήμα. Προς τα πάνω επικρατούν αδρόκοκκοι φαμμίτες με παρεμβολές ραδιολαρτιών, ερυθρών μαργών και υπολιθωρακικών ή ωλεθικών σβεστωλίθων.

Απολιθώματα:

LEGEND

HOLOCENE

Alluvial deposits (al) consisting of unconsolidated clayey-sandy materials, gravels and cobbles at the river and torrent beds, as well as small terraces.
Recent and old talus cones, scree (H.Cs.Sc): silt, loam with scree, loose conglomerates.

PLEISTOCENE

Thoknia – Potamia formations: undivided system of terraces, silt, clays, sands, loose conglomerates and scree.
Thickness: 10 to 40m approximately.

Horemli formations

Marathoussa beds: alternations of marls, clays, humus clays and lignite beds with intercalations of fine-grained sands and lenticular layers of loose conglomerates of lacustrine facies.
The lignite-bearing beds are wedged towards the basin margins where fluvial deposits prevail. The delimitation of the lacustrine-fluvial facies is not stable either in the horizontal or the vertical evolution.

Fossils:

Lamellibranchs: *Unio cf. crassus* (PRETZIUS), *Unio* sp., *Viviparus* sp., *Valvata alpestris* (KUSTER), *Valvata naticina* (MENCKE), *Valvata* sp., *Bithynia tentaculata* (LINNE), *Planorbis cornuus* (LINNE), *Gyraulus albus* (MULLER), *Angulus lacustris*.

Gastropods: *Poistidium* sp.

Ostracodes: *Candona «alföldensis»* n. sp., *C. angulata* (S.W. MULLER), *C. brevicornis* (KILIE), *C. «concolor»* n. sp., *C. falcata* (ALM), *C. neglecta neglecta* (SARS), *C. ohryda* (KILIE), *C. rostrata* (BRADY-NORMAN), *Cyclocypris laevis* (VANRA), *Cypricercus «Kasinus»* n. sp., *Cypris marginata* (STRAUS SARS), *Dolerocypris «muleri»* n. sp., *Eucypris clavata* (BRADY), *Eucypris inners* (KAUFMANN), *Leucocythere «gracilis»* n. sp., *Potamocypris fulva* (BRADY).

Charophytes: *Chara cf. hispida*, *Chara cf. vulgaris*.

Proboscoides: *Archidiscodon meridionalis meridionalis*, *Palaeotoxodon antiqius antiqius*, *Mammotoxodon primigenius* (LUMENBACH).

Megalopod beds: alternations of marls, clays, sands and slightly cohesive conglomerates of fluvial facies. They form the marginal base and a lateral transition of the Marathoussa beds. Southwards they overlie with angular unconformity (5°-15°) the Makryssion stage.

Total thickness of Horemli formations: 200m.

Apidias formation: alternations of red clayey-sandy beds with slightly cohesive conglomerates and scree with red clays.
Thickness: 50 to 100m.

NEOGENE

UPPER PLEIOCENE

Trilofa formation: clays, marls of lacustrine facies with intercalations of slightly cohesive conglomerates in the upper part of the stage as well as fluvial deposits with alternations of clays, marls, sands, slightly cohesive cross-bedded conglomerates. Probably the deposits of the Trilofa stage constitute the lateral transition of the Makryssion stage.

Makryssion formation: clays, marls of lacustrine facies with alternations of mainly lignite layers, a few rim thick, and conglomerates. Locally, lignite beds are intercalated, 0,20 to 1m thick, as in the area of Makryssion.

Fossils:

Lamellibranchs: *Dreissena* sp., *Congeria* sp. (?)

Gastropods: *Viviparus argesiensis* (STEFANESCU), *Valvata* sp., *Lithoglyphus* sp., *Bithynia* sp., *Cochlicopa* sp.

Ostracodes: *Candona kirchbergeris* (SIEBER), *C. acuminata «pliocenica»* n. sp., *C. «trilofensis»*, *C. brevicornis* (KILIE), *C. neglecta «megala»* n. sp., *Cytherissa lacustris* n. sp., *Hyocypris lacustris* (KAUFMANN), *Hyocypris inermis* (KAUFMANN), *Limnocythere «kallimorpha»* n. sp., *Leptocythere karumani* (KILIE).

Total thickness of formations: 60 to 120m

PINDOS ZONE

PALEOGENE

PALEOCENE – EOCENE (?)

Flysch transition beds: alternations of thin-platey to bedded, micritic-biomicritic, pelagic limestones with layers or nodules of siliceous and marly limestones, red marls in the lower part. Upwards they pass into flysch sediments with marly or brecciated limestones, alternations of clayey, arenaceous and massive sandstones (f.e. Paliohouni).

Fossils:

Globotruncana sp., *Globotruncana arcu* (CUSHMAN) (twisted)

Thickness: 0-50m.

UPPER CRETACEOUS

TURONIAN – MAASTRICHTIAN

Limestones: platy to bedded, multicoloured, micritic or biomicritic, of pelagic facies with layers or nodules of red-black siliceous. In the upper parts, marly or red pelites are intercalated, as well as sandstones and microclastic limestones.

Fossils:

Globotruncana conica (WHITE), *Globotruncana g. linneiama* (D'ORBIGNY), *Globotruncana g. stuarti* (DE LAPPARENT)

Age: Maastrichtian

Globotruncana ventricosa WHITE, *Globotruncana elevata* (BROTZEN), *Rosita formicata* (PLUMMER)

Age: Santonian – Maastrichtian.

Pithonella ovalis (KAUFMANN), *Globotruncanidae*

Age: Turonian – Coniacian.

Thickness: 150-200m.

CENOMANIAN – LOWER TURONIAN

First flysch: clastic series of brownish or green, fine-coarse-grained sandstones with layers or intercalations of red marls, marly limestones and microclastic, microbrecciated limestones. In the transition beds towards the upper cretaceous limestones, alternations occur, of fine-grained sandstones, marly limestones and microclastic-micritic limestones.

Fossils:

Avoltsaccus kotori RADOICIC, *Monchamontina arpeninica* (DE CASTRO), *Marginotruncana marginata* (REUSS), *Helvetoglobotruncana helvetica* (BOLL), *Pithonella ovalis* (KAUFMANN), *Pithonella* sp., *Hedbergella* sp., *Heterohelicidae*, *Hedbergellinae*.

In microbreccia rubbles:

Orbitolina sp., *Orbitolina aff. concaua* (LAMARCA), *Nesozaneta* sp., *Retalipora* sp., *Pseudocyclammina* sp., *Bacinctella irregularis* (RADOICIC), *Thaumatoporella*

Thickness: 0 to 100m.

JURASSIC – LOWER CRETACEOUS

Chert series: multi-coloured mainly radiolarites in alternations with fine-grained sandstones in the lower part. Upwards coarse-grained sandstones prevail with intercalations of radiolarites, red marls and sublitolographic or oolitic limestones.

Fossils:

Εικόνα 12. Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Μεγαλόπολη (ΙΓΜΕ, 1997).

Μέλη μιας διαμειγμένης οφιολιθικής-ηφαιστειακής σειράς: εμφανίζονται ως διαβάσεις, «pillow» λάβες, τόφφοι, τοφίτες. Έχουν υποστεί αυτομετασμάτωση και μετασχηματισθούν σε σπιλίτες. Οι χημικές αναλύσεις δίνουν χαμηλό ποσοστό τιτανίου το οποίο είναι χαρακτηριστικό για τους οφιολιθικούς της ανατολικής Τηθύδας (D. Richter, G. Lensch, 1977). Οι λάβες απαντώνται τόσο στον πρώτο φλύσχι και την κερατολιθική σειρά, όσο και στη βάση των καλυμμάτων των ανακρηττωμένων ασβεστολιθών της Ζώνης Πίνδου σε τεκτονική σχέση.



Members of a disrupted ophiolitic-volcanic series: they occur as diabases, pillow lavas, tufts, tuffites. They have undergone autometasomatism and were transformed into spilites. The chemical analyses gave a low proportion of titanium which is characteristic for the ophiolites of Eastern Tethys. (D. Richter, G. Lensch, 1977). Lavas occur both in the first flysch and the chert series as well as in the base of upper-cretaceous limestones nappes of Pindos zone in tectonic relationship.

Τεκτονική σχηματισμός: εμφανίζεται στη βάση του επωθημένου Πινδικού καλύμματος και αποτελείται από υπολείμματα ψαμμίτων, κροταλιθών, εκρηξιγενών πετρωμάτων και κροκαλοαλυτοπαγών των ασβεστολιθών των Ζωνών Τρίπολης και Πίνδου. Η σχετική ηλικία της τεκτονικής κίνησης προκύπτει από τα τεμάχια ηφαιστειακών ασβεστολιθών της Ζώνης Τρίπολης που εμπεριέχονται σ' αυτήν. Θα πρέπει δε να είναι Άνω Ολιγοκαινική – Κάτω Μειοκαινική.
Πάχος: από 2 έως 40m περίπου.



Tectonic formation: occurring at the base of the overthrust Pindos nappe and consisting of remnants from sandstones, cherts, extrusive rocks and breccia-conglomerates of the Tripolis and Pindos zones limestones. The relative age of the tectonic movement is obtained from the blocks of eocene limestones of the included Tripolis zone, and should be Upper Oligocene-Lower Miocene.
Thickness: from 2 to 40m approximately.

ΖΩΝΗ ΤΡΙΠΟΛΗΣ

ΑΝΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ – ΟΛΙΓΟΚΑΙΝΟ

Φλύσχι: κλαστικά κείμενα αποτελούμενα κυρίως από λεπτο- έως αδρόκοκκους ψαμίτες με ενστρώσεις αργίλων, αργιλικών μαργών και παρεμβολές μονόμικτων κροκαλοπαγών. Τα κλαστικά υλικά προέρχονται από τους ασβεστολιθούς της ζώνης Τρίπολης ή της Πίνδου. Τοπικά απαντώνται διάσπαρτοι ολιγοβόλοι.
Υπερκείται ασφήφανα των υποκείμενων κλαστικών – λατυποπαγών ασβεστολιθών του Λουθησίου – Πριαμηνίου.
Απολιθώματα:



Flysch: clastic sediments consisting mainly of fine-to coarse-grained sandstones with layers of clays, clayey marls and intercalations of monomict conglomerates. The clastic materials derive from the limestones of Tripolis or Pindos zone. Dispersed olistoliths locally occur. They overlie unconformably the underlying clastic brecciated limestones of Lutetian-Priabonian.

Globigerina sp., *Globorotalia* sp.

Fossils:
Thickness: 450-500m.

TRIPOLIS ZONE

UPPER EOCENE – OLIGOCENE

ΠΑΛΑΙΟΚΑΙΝΟ – ΑΝΩΤΕΡΟ ΗΩΚΑΙΝΟ

Ασβεστολίθοι με παρεμβολές δολομιτωμένων ασβεστολιθών, δολομιτών: τεφροί και σκοτεινότεφοι, τοπικά βιτωμενιούχοι, βιοκλαστικοί, κολλοειδικοί, ενίοτε λατυποπαγείς με ενστρώσεις ή κονδύλους μαζών πυριτολίθων. Λεπτο- έως παχυστρωματώδεις, θαλάσσιες έως υψόλυμρες φάσεις.
Απολιθώματα:



Limestones with intercalations of dolomitized limestones, dolomites: grey and dark-coloured, locally bituminous bioclastic, oolitic, occasionally brecciated with layers or nodules of black silt. Thin- to thick-bedded of marine to brackish facies.

Nummulites fabianii (FLENER), *Gioborotalia* sp., *Discocyclina* sp., *Sphaerogypsina* sp., *Globigerina* sp., *Chapmanina* sp., *Baculogypsinoidea* sp., *Gryzbowskia* sp., *Miliolidae*, *Rotaliidae*, *Melobesioidea*.

Fossils:
Age: Priabonian.

Ηλικία: Πριαμηνό.

Ηλικία: Λουθησίο.

Ηλικία: Υπρέσιο.

Ηλικία: Παλαιόκαινο.

Πάχος: 450-500m.

ΚΡΗΤΙΑΚΟ

Ασβεστολίθοι, δολομιτικοί ασβεστολίθοι, τεφροί, σκοτεινόχρωμοι, βιοκλαστικοί στους κατώτερους ορίζοντες, μικροαλυτοπαγείς, μεσο- έως παχυστρωματώδεις.
Από πάνω προς τα κάτω προδιοριστήκαν τα παρακάτω απολιθώματα.



Limestones, dolomitic limestones: grey, dark-coloured, bioclastic in the lower horizons, microbrecciated, medium- to thick bedded. From top to base, the following fossils have been determined:

Rhapydionina liburnica (STACHE), *Laffiteina marsicana* FARINACCI, *Cuneolina* sp., *Miliolidae*.
Monchamontia arpeninica (DE CASTRO), *Rotorbinella scarsellai* TORRE, *Aeolisaccus kotori* RADICIC, *Miliolidae*, rudist fragments.
Nezzazinella picardi (HENSON), *Cuneolina* sp., *Nezzazata* sp., «*Thaumatoporella*», *Discorbidae*.
Salpingoporella dinarica RADICIC, «*Bacinnella*», *Favreina salvensis* (PAREJAS).
Debarina hahounerensis FOURCADE, RAOULT & VILA, *Favreina salvensis* (PAREJAS), *Glomospira* sp., *Salpingoporella* sp., *Aeolisaccus* sp., *Ophthalmidium* sp., «*Thaumatoporella*», *Pfenderinidae*, *Ophthalmididae*, *Ammodiscidae*.

Age: Malm.
Age: Senonian.
Age: Cenomanian – Turonian.
Age: Aptian – Albian.
Age: Palaeocene.
Thickness: 120m.

Ηλικία: Μαιστρίτιχο.

Ηλικία: Σενώνιο.

Ηλικία: Κενομάνιο – Τουρόνιο.

Ηλικία: Απτιο – Άλβιο.

Ηλικία: Νεοκόμιο.

Πάχος: 300m περίπου.

ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

Ασβεστολίθοι, δολομιτικοί ασβεστολίθοι, δολομιτές, ροδόχροοι, τεφρόχροοι, έως τεφρομελένες, ομαγινές, πλακόβεις έως παχυστρωματώδεις, ενίοτε άστρωτοι, βιομικρικοί ασβεστολίθοι με παρεμβολές δολομιτωμένων ασβεστολιθών και δολομιτικών λατυποπαγών και δολομιτών. Ευρισκονται σε τεκτονική επαφή με τη στρώματα Τυρού και το φυλλιτικό υπόβαθρο της Ζώνης Τρίπολης.
Απολιθώματα:



Limestones, dolomitic limestones, dolomites: reddish, greyish to grey-black massive, platy to thick-bedded, occasionally unbedded biomicritic limestones with intercalations of dolomitized limestones, dolomitic breccias and dolomites. They are in tectonic contact with Tyros beds and the phyllite basement of Tripolis zone.

Kurnubia palastiniensis HENSON, *Trocholonia* sp., *Cladocoropsis mirabilis* FELIX, *Salpingoporella sellii* (CRESCENTI), *Salpingoporella annulata* CAROZZI, «*Thaumatoporella*», *Pfenderinidae*, *Lituolidae*, *Ammodiscidae*, *Valvulinidae*, *Cyanophyta*.
Labyrinthina recoarensis CATI, *Aeolisaccus* sp., «*Thaumatoporella*», *Valvulinidae*, *Ataxopora*, *Hegmiiidae*, *Ammodiscidae*, *Palaeodasycladus mediterraneus* (PIA).

Fossils:
Age: Malm.
Age: Dogger – Lias.
Thickness: 450-550m.

Ηλικία: Μάλμιο.

Ηλικία: Δογγέριο – Λιάσιο.

Πάχος: 450-550m.

ΠΕΡΜΙΟ – ΚΑΤΩΤΕΡΟ ΤΡΙΑΔΙΚΟ (?)

Στρώματα Τυρού (σειρά ανθρακικών κημάτων): σκοτεινόχρωμοι, βιτωμενιούχοι, λεπτοπλακόβεις, παχυστρωματώδεις, ενίοτε ομαγινές αδρόκρυσταλλικοί ασβεστολίθοι, με λεπτές ενστρώσεις γύψου, παρεμβολές δολομιτών και εναλλαγές ανθρακικών σχιστολίθων.
Ευρισκονται σε τεκτονική επαφή με τη φυλλιτική-μεταχαλιτική σειρά (περιοχή Καρατούλα-Λυκόβειας).
Απολιθώματα:



Tyros beds (carbonate sediment series): dark-coloured, bituminous, thin-platy, thick-bedded, occasionally massive, coarse-crystalline limestones with thin layers of gypsum, dolomite intercalations and alternations of carbonate schists. They are in tectonic contact with the phyllite-met quartzite series (Karatoula-Lycohia area).
Fossils:

Globivalvulina graeca REICHEL, *Colaniella* sp., *Rubuloides* sp., *Mizzia vebetiana* SCHUBERT. (Kalamata sheet).
Thickness: 80 to 100m.

(φύλλο Καλαμάτα).
Πάχος: 80 έως 100m.

ΦΥΛΛΙΤΙΚΗ – ΧΑΛΑΣΙΤΙΚΗ ΣΕΙΡΑ

Εμφανίζεται στο ΒΑ τμήμα του φύλλου, είναι έντονα τεκτονισμένη με κεκλιμένες μικροπτυχές αποτελούμενη από χλωριτικούς, αμφιβολιτικούς, γραφητικούς, μαρμαρυγκαούς σχιστολίθους, με ταχαλιζίτες και μετακροκαλοπαγή.
Πάχος: υπερβαίνει τα 500m.



It occurs in the NE part of the sheet, strongly tectonized with inclined microfolds, consisting of chlorite amphibolitic, graphitic, micaceous schists, metaquartzites and metaconglomerates.
Thickness: exceeding 500m.

Γεωλογικό όριο και πιθανή πρόεκτασή του

Ρήγμα και πιθανή πρόεκτασή του

Ρήγμα πιθανό ή καλυμμένο

Ρήγμα με κατακόρυφη κίνηση-μεταπτώσεις και πιθανή πρόεκταση.

Επίπτωση και πιθανή πρόεκτασή της

Επώθηση και πιθανή πρόεκτασή της

Τεκτονική επαφή

Υπόλειμμα τεκτονικού καλύμματος

Άξονας αντικλίνο με φορά βύθισης

Άξονας συγκλίνο με φορά βύθισης

Άξονας κεκλιμένου αντικλίνο - συγκλίνο

Διεύθυνση και κλίση στρωμάτων

Οριζόντια στρώματα

Κατακόρυφα στρώματα

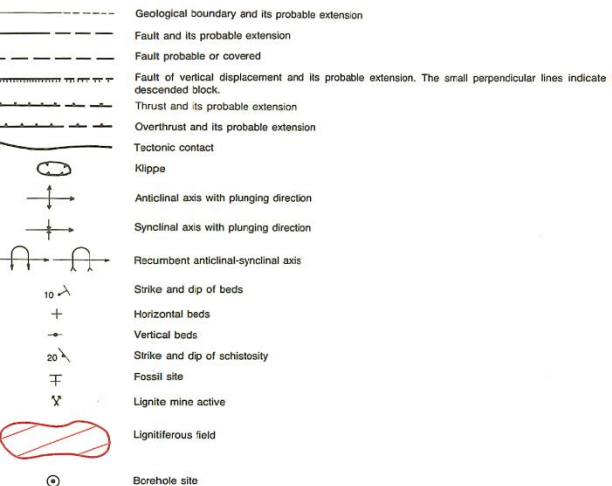
Διεύθυνση και κλίση σχιστότητας

Θέση απολιθωμάτων

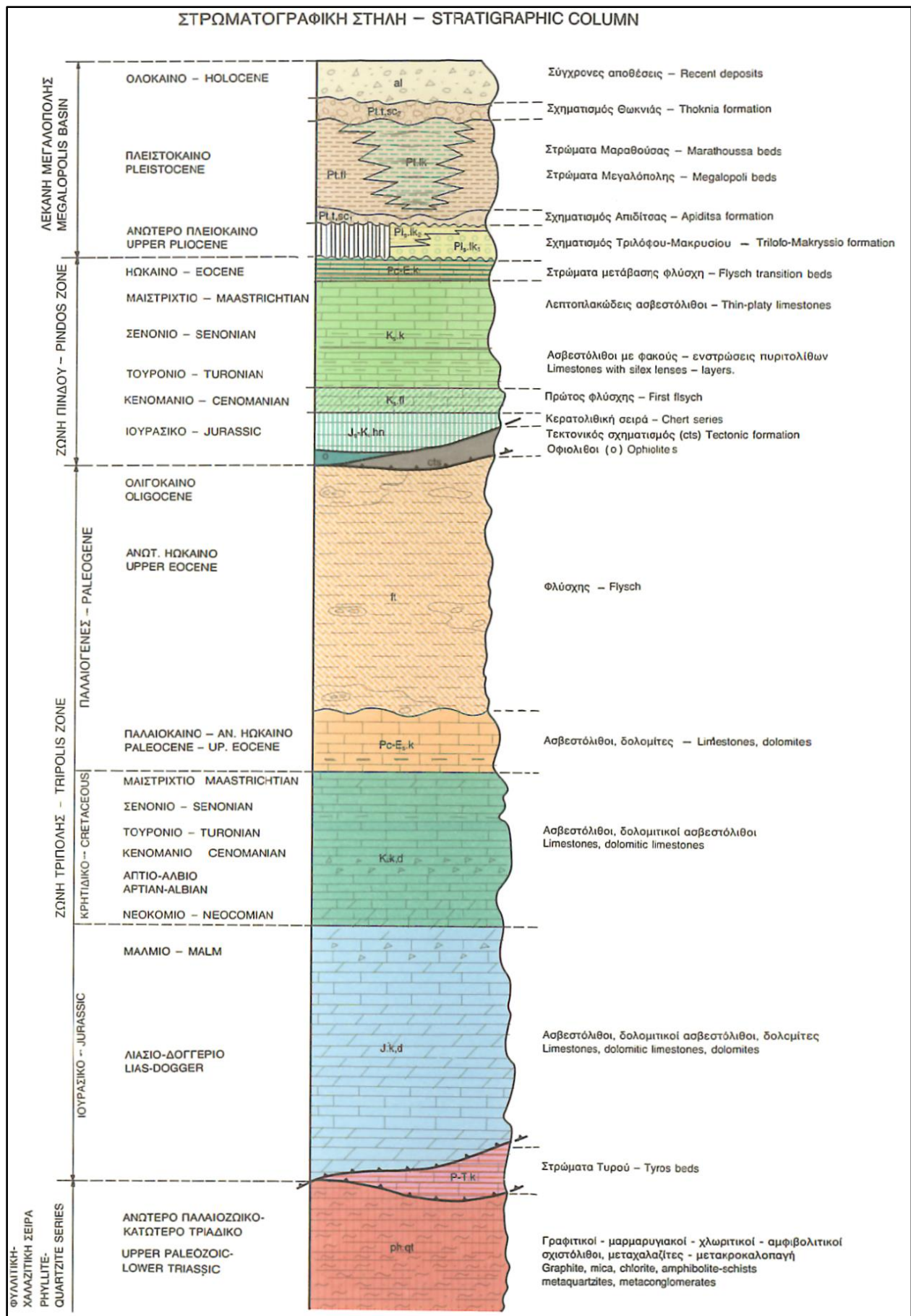
Λιγνιτωρυχείο ενεργό

Λιγνιτοφόρο πεδίο

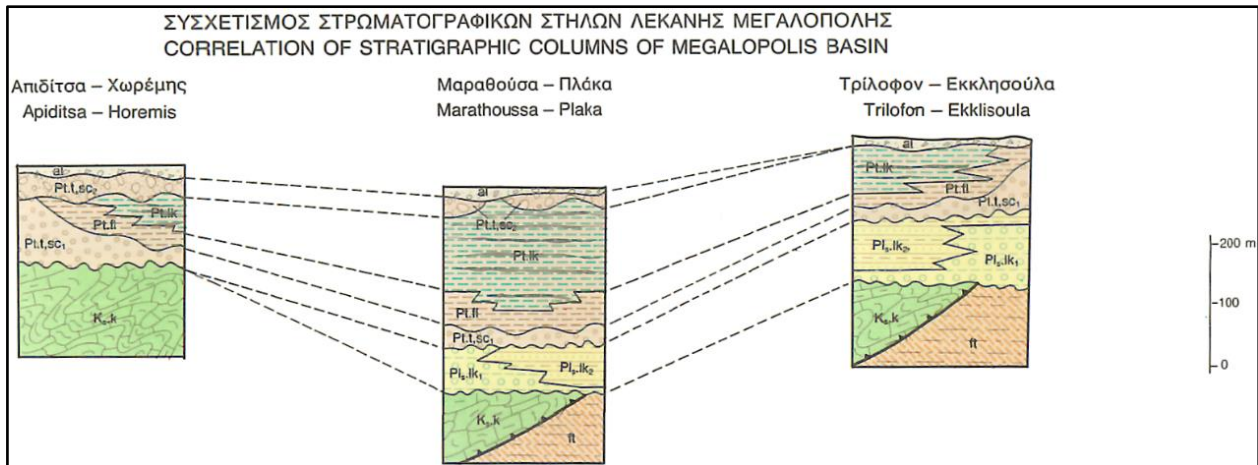
Θέσεις γεωτρήσεων



Εικόνα 13. Απόσπασμα υπομνήματος γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Μεγαλόπολη (ΙΓΜΕ, 1997).



Εικόνα 14. Στρωματογραφική στήλη φύλλου χάρτη Μεγαλόπολης, (ΓΓΜΕ, 1997).



Εικόνα 15. Συσχετισμός των στρωματογραφικών στηλών της λεκάνης Μεγαλόπολης (ΠΓΜΕ, 1997).

Σχηματισμοί Υποβάθρου Λεκάνης

Οι σχηματισμοί όπου βρίσκονται στη βάση του υποβάθρου της λεκάνης της Μεγαλόπολης είναι τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Περμοτριάδικης φυλλιτικής-χαλαζιτικής σειράς και τα στρώματα Τυρού. Οι εμφανίσεις των πετρωμάτων αυτών εντοπίζονται στα βορειοανατολικά και ανατολικά περιθώρια της λεκάνης

Σχηματισμοί Ενότητας Γαβρόβου-Τριπόλεως

Η ενότητα Γαβρόβου-Τρίπολης εντοπίζεται στη περιοχή μελέτης μέσω των ανθρακικών σχηματισμών και του φλύσχη (Ανώτερο Ηώκαινο-Ολιγόκαινο). Καταλαμβάνει σημαντική έκταση στην περιοχή και συναντάται στην ορεινή περιοχή βόρεια και νότια των παρυφών της λεκάνης. Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομιτικοί ασβεστόλιθοι είναι παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι, και το πάχος τους υπερβαίνει σε ορισμένες περιπτώσεις τα 1000 m (ηλικία Ιουρασικό-Ανώτερο Ηώκαινο).

Η σειρά του φλύσχη αποτίθεται ασύμφωνα σε παλιά επιφάνεια καρστικοποιημένων ασβεστόλιθων της ενότητας Γαβρόβου-Τριπόλεως, και χαρακτηρίζεται κυρίως από ιλυολίθους και ψαμμίτες, και παρεμβολές μονόμικτων κροκαλοπαγών. Παράλληλα, εντός των φλυσχικών εμφανίσεων εντοπίζονται ενστρώσεις πελαγικών ασβεστόλιθων και κερατόλιθων. Το πάχος του φλύσχη στην περιοχή ενδιαφέροντος υπολογίζεται περίπου στα 450-500 m.

Γενικότερα, οι υδροφόροι ορίζοντες όπου αναπτύσσονται εντός των ασβεστόλιθων της ενότητας στη περιοχή της λεκάνης, θεωρείται ότι δεν επηρεάζουν τις μεταλλευτικές δραστηριότητες, καθώς αναπτύσσονται σε πολύ μεγάλο βάθος.

Σχηματισμοί Ενότητας Πίνδου

Οι σχηματισμοί της ενότητας Πίνδου εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο και δυτικό τμήμα της λεκάνης, καθώς και σε ορισμένες θέσεις του ανατολικού τμήματος της. Στη περιοχή μελέτης δεν συναντάται ολόκληρη η στρωματογραφική ακολουθία της ενότητας, αλλά οι σχηματισμοί ηλικίας μεταξύ Ιουρασικού και Ηωκαίνου, γεγονός όπου επιβεβαιώνεται από το Φ.Χ. ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΙΣ (1:50.000). Στη βάση της ενότητας Πίνδου στρωματογραφικά συναντάται η κερατολιθική σειρά, η οποία αποτελείται κυρίως από ραδιολαρίτες σε εναλλαγές με λεπτόκοκκους ψαμμίτες στο κατώτερο τμήμα. Το ορατό πάχος της κερατολιθικής σειράς υπολογίζεται στα 100 m.

Στη συνέχεια, η παρουσία του πρώτου φλύσχη ηλικίας Κενομανίου-Κατώτερου Τουρωνίου είναι ιδιαίτερη, καθώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση των υπόγειων υδάτων στην περιοχή σε συνδυασμό με τις εναλλαγές με τους ασβεστόλιθους. Ο πρώτος φλύσχη χαρακτηρίζεται από μία κλαστική σειρά καστανόχρωμων ή πράσινων λεπτών αδρόκοκκων ψαμμιτών, με ενστρώσεις και παρεμβολές ερυθρών μαργών, και μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Το πάχος του κυμαίνεται μεταξύ 0 και 100 m.

Οι εμφανίσεις του πρώτου φλύσχη μεταβαίνουν σε Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους, ηλικίας Τουρωνίου-Μαιστριχτίου. Το πάχος του σχηματισμού κυμαίνεται μεταξύ 150 και 200 m, και αποτελείται από πλακώδεις έως στρωματώδεις ασβεστόλιθους με ενστρώσεις ή κονδύλους ερυθρών-μαύρων πυριτόλιθων. Η ανώτερη σειρά προς τον δεύτερο φλύσχη αποτελείται από πηλίτες, ψαμμίτες και μικροκλαστικούς ασβεστόλιθους.

Τέλος, τα στρώματα μετάβασης του φλύσχη πάχους έως 50 m χαρακτηρίζονται από εναλλαγές πελαγικών ασβεστόλιθων με ενστρώσεις ή κονδύλους πυριτολίθων, μαργαϊκών ασβεστόλιθων και ερυθρών μαργών στο κατώτερο τμήμα. Η μετάβαση προς τον φλύσχη χαρακτηρίζεται από μαργαϊκούς ή λατυποπαγείς ασβεστόλιθους, και εναλλαγές αργιλούχων, και συμπαγών ψαμμιτών.

Στα δυτικά περιθώρια της λεκάνης παρατηρούνται μικρές εμφανίσεις μαγματικών πετρωμάτων βασικής σύστασης, όπου αναφέρονται ως μέλη οφιολιθικής-ηφαιστειακής σειράς. Βρίσκονται σε τεκτονική επαφή με τα πετρώματα της ζώνης Πίνδου, τόσο στον πρώτο φλύσχη και την κερατολιθική σειρά, όσο και στη βάση των καλυμμάτων των ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων.

Ιζήματα της λεκάνης της Μεγαλόπολης

Η απόθεση των ιζημάτων πραγματοποιήθηκε σε βυθίσματα, τα οποία σχηματίστηκαν μετά το τέλος της αλπικής ορογένεσης λόγω της δράσης κανονικών ρηγμάτων. Η προέλευση των ιζημάτων είναι λιμναία ή ποτάμια στην πλειοψηφία τους. Τα παλαιότερα ιζήματα της λεκάνης χρονολογούνται στο Ανώτερο Πλειόκαινο (Vinken, 1965). Τα νεότερα ιζήματα είναι λιμναίας προέλευσης, έχοντας πληρώσει με υλικό την λεκάνη, το οποίο αποτελείται κυρίως από μάργες, αργίλους, ψαμμίτες, και χαλαρά έως συνεκτικά κροκαλοπαγή. Το μέγιστο πάχος των ιζημάτων υπολογίζεται ότι υπερβαίνει τα 200 m.

Τα ιζήματα της λεκάνης της Μεγαλόπολης διακρίνονται στις βαθμίδες του Μακρυσίου και του Τριλόφου κατά το Πλειόκαινο, στις βαθμίδες της Απιδίτσας, του Χωρεμίου (με τους σχηματισμούς της Μαραθούσας και της Μεγαλόπολης), της Ποταμιάς και Θωκνίας κατά το Πλειστόκαινο. Τέλος, τα ιζήματα του Ολόκαινου διακρίνονται σε τρεις φάσεις.

Βαθμίδες Πλειοκαίνου

[1] Βαθμίδα Μακρυσίου

Η βαθμίδα Μακρυσίου πρόκειται για τυπικά ιζήματα, τα οποία αποτελούνται από μάργες με θραύσματα φυτικών υπολειμμάτων, με παρεμβολές λιγνιτικών στρωμάτων. Πρόκειται για επιφανειακές εμφανίσεις σε περιοχές της λεκάνης τεκτονικά ανυψωμένες. Το συνολικό τους πάχος δεν ξεπερνά τα 200 m, ενώ προς τα δυτικά της λεκάνης αποσφηνώνονται κάτω από τα Πλειστοκαινικά ιζήματα. Ουσιαστικά, η βαθμίδα Μακρυσίου περιλαμβάνει τα αρχαιότερα στρώματα ιζημάτων της λεκάνης.

Οι μάργες της βαθμίδας περιέχουν σημαντικό αριθμό φυτικών υπολλειμάτων και απολιθωμάτων. Το γεγονός αυτό συνέβαλλε στον ακριβή προσδιορισμό της ηλικίας των ιζημάτων, αλλά και στην αναπαράσταση του περιβάλλοντος σχηματισμού τους.

Σύμφωνα με τις μελέτες των Vinken (1965) και Hiltermann and Lüttig (1969) το παλαιο-περιβάλλον σχηματισμού των μαργών της βαθμίδας του Μακρυσίου μία σχετικά βαθιά και μεγάλη σε έκταση λίμνη, με νερό πλούσιο σε ανθρακικά άλατα, των οποίων η προέλευση οφείλεται στην επιφανειακή έκθεση καρστικού υδροφόρου ορίζοντα.

[2] Βαθμίδα Τριλόφου

Η βαθμίδα Τριλόφου πρόκειται για πιθανώς ποτάμια ιζήματα, τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα αργίλων, άμμων και κροκάλων. Η βαθμίδα Τριλόφου τοποθετείται στρωματογραφικά πάνω από την βαθμίδα Μακρυσίου λόγω των εμφανίσεων λιγνιτικών στρωμάτων της. Η διάβρωση και μεταφορά των λεπτών λιγνιτικών στρωμάτων της βαθμίδας του Μακρυσίου, θεωρείται ότι κατά συνέπεια δημιούργησαν τα τεμάχια της βαθμίδας του Τριλόφου, τα οποία εντοπίζονται στους μαργαϊκούς σχηματισμούς της πρώτης βαθμίδας.

Το συνολικό τους πάχος εκτιμάται ότι ανέρχεται στα 100 έως 120 m, και η ηλικία απόθεσης τους εκτιμάται στο τέλος του Ανώτερου Πλειόκαινου.

Βαθμίδες Πλειστοκαίνου

Οι πλειστοκαινικές βαθμίδες όπου συναντώνται στην λεκάνη είναι η βαθμίδα Απιδίτσας, η βαθμίδα Χωρεμίου με τα στρώματα Μεγαλόπολης και τα στρώματα Μαραθούσας και η βαθμίδα Θωκνίας-Ποταμιάς.

[3] Βαθμίδα Απιδίτσας

Η βαθμίδα Απιδίτσας αποτελεί την βάση των ιζημάτων και αποτελείται από εναλλαγές ερυθρών αργιλο-αμμούχων στρωμάτων με ελαφρώς συνεκτικά κροκαλοπαγή, και πλευρικά κορήματα με ερυθρές αργίλους. Το πάχος τους κυμαίνεται μεταξύ 50 και 100 m. Ο σχηματισμός αυτός εντοπίζεται επιφανειακά κατά μήκος των δυτικών περιθωρίων της λεκάνης.

[4] Βαθμίδα Χωρεμίου

Η βαθμίδα Χωρεμίου αποτελείται από δύο σχηματισμούς, οι οποίοι διαχωρίζονται σύμφωνα με τις κλιματικές συνθήκες όπου επικρατούσαν κατά την περίοδο της απόθεσης τους. Ο παλαιότερος σχηματισμός είναι της Μαραθούσας, ο οποίος αποτέθηκε υπό συνθήκες θερμού κλίματος, ενώ ο σχηματισμός Μεγαλόπολης είναι νεότερος και αποτέθηκε υπό ψυχρές κλιματικές συνθήκες.

Ο σχηματισμός Μαραθούσας, ο οποίος αποτέθηκε σε συνθήκες θερμού κλίματος, εμφανίζεται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης (Okuda et al., 2002). Πρόκειται για την κύρια λιγνιτοφορία της λεκάνης της Μεγαλόπολης, και συνίσταται από αργίλους λιμναίου περιβάλλοντος και μάργες πλούσιες σε οργανικό υλικό. Στρωματογραφικά διακρίνονται τρεις λιγνιτοφόρες στιβάδες, οι οποίες διαχωρίζονται μεταξύ τους από μεταβατικά στρώματα αργίλων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη διάκριση ισχύει για το κεντρικό τμήμα της λεκάνης, όπου στη περιοχή αυτή εντοπίζεται η μεγαλύτερη ανάπτυξη του σχηματισμού όσον αφορά το πάχος. Στα περιθώρια της λεκάνης εντοπίζονται ορισμένες από τις στοιβάδες, με αποτέλεσμα να προκύπτει μια περισσότερο σύνθετη λιθοστρωματογραφική εικόνα.

Η σημερινή σύνθετη εικόνα όπου επικρατεί με τις εναλλαγές λιγνιτοφόρων στρωμάτων και λιμναίων ιζημάτων οφείλεται στις μεταβολές του ρυθμού βύθισης της λεκάνης. Οι συνεχείς μεταβολές μεταξύ λιμναίου και ελώδους περιβάλλοντος έχουν επιφέρει το παραπάνω αποτέλεσμα.

Αντίθετα, ο σχηματισμός της Μεγαλόπολης αποτέθηκε σε μία διαδοχική περίοδο, η οποία ήταν παγετώδης και χαρακτηρίστηκε από διάβρωση των παλαιότερων σχηματισμών και από απόθεση κλαστικών ιζημάτων, ποτάμιας κυρίως προέλευσης. Τα ιζήματα όπου συνιστούν τον σχηματισμό της Μεγαλόπολης αποτελούνται από εναλλασσόμενα στρώματα κροκαλών, άμμων, αργίλων και ιλύων.

[5] Βαθμίδα Ποταμιάς

Τα παλαιότερα ιζήματα της βαθμίδας Ποταμιάς αποτέθηκαν υπό συνθήκες θερμού κλίματος. Τα ιζήματα αποτελούνται από ψαμμιτικές και ασβεστολιθικές κροκάλες, οι οποίες έχουν υποστεί έντονη χημική αποσάθρωση. Αποτέλεσμα της χημικής αποσάθρωσης όπου δέχθηκαν τα ιζήματα είναι ο σχηματισμός ερυθροκάστανων πηλών (terra rossa).

Η βαθμίδα Ποταμιάς εκτιμάται ότι αποτελεί την ανώτερη βαθμίδα όπου συναντάει το ποτάμιο σύστημα του Αλφειού και των παραποτάμων του κατά την σημερινή περίοδο. Το πάχος των ιζημάτων πάνω από το επίπεδο της κοιλάδας όπου έχει διαμορφώσει το ποτάμιο σύστημα κυμαίνεται μεταξύ 10 και 60 m, με μέσο πάχος 25 m. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου σταμάτησε η βύθιση της λεκάνης και ο σχηματισμός λιμνών, και ευνοήθηκε η μηχανική και χημική αποσάθρωση των ιζημάτων. Κατά συνέπεια, την περίοδο αυτή άρχισε ο σχηματισμός του σύγχρονου ποτάμιου συστήματος της λεκάνης.

[6] Βαθμίδα Θωκνίας

Η βαθμίδα Θωκνίας αποτελεί τη τελευταία βαθμίδα του Πλειστοκαίνου, της οποίας τα ιζήματα είναι παρόμοια με τα ιζήματα όπου αποτέθηκαν στη βαθμίδα Ποταμιάς (Nickel et al., 1996). Τα ιζήματα της βαθμίδας Θωκνίας αποτελούνται από αποθέσεις ερυθροκάστανων πηλών και από αποθέσεις αδρομερών κλαστικών υλικών όπως άμμοι, κροκαλοπαγή και κορήματα.

Οι εμφανίσεις της βαθμίδας Θωκνίας εντοπίζονται κυρίως στα κεντρικά και βόρεια τμήματα της λεκάνης. Η εμφάνιση τους στα νότια τμήματα της λεκάνης Μεγαλόπολης είναι περιορισμένη. Η βαθμίδα Θωκνίας αντιπροσωπεύει την ενδιάμεση βαθμίδα του ποτάμιου συστήματος, το οποίο διατρέχει την λεκάνη. Τα ιζήματα εντοπίζονται 8 έως 12 m άνωθεν της σημερινής στάθμης του ποταμού Αλφειού, και το πάχος τους κυμαίνεται μεταξύ 5 και 10 m.

Ιζήματα Ολοκαίνου

Τα ολοκαινικά ιζήματα όπου συναντώνται στη λεκάνη της Μεγαλόπολης υποδιαιρούνται σε τρεις φάσεις. Οι δύο πρώτες φάσεις αντιστοιχούν στην χαμηλότερη ποτάμια αναβαθμίδα, η οποία χωρίζεται σε κατώτερη και ανώτερη. Η τρίτη φάση αντιστοιχεί στις σύγχρονες ποτάμιες αποθέσεις του ποταμού Αλφειού.

Το ανώτερη φάση της χαμηλότερης ποτάμιας αναβαθμίδας αποτελεί το τμήμα με τη μεγαλύτερη εξάπλωση, συγκριτικά με τις υπόλοιπες αναβαθμίδες όπου έχουν σχηματιστεί στη λεκάνη. Το μέσο πάχος της ανώτερης φάσης είναι 5 m και εντοπίζεται 2 έως 7 m πάνω από την σημερινή στάθμη του ποταμού. Τα ιζήματα όπου αντιστοιχούν στη φάση αυτή είναι κυρίως κροκάλες, αντικατοπτρίζοντας τη σύσταση των πετρωμάτων όπου δομούν τα περιθώρια της λεκάνης. Σύμφωνα με τον Vincken (1965) η απόθεση των ιζημάτων αυτής της φάσης ολοκληρώθηκε πριν από 3.000 χρόνια.

Η δεύτερη φάση των ολοκαινικών ιζημάτων χαρακτηρίζεται από ποτάμιες αποθέσεις, τα ιζήματα των οποίων εντοπίζονται 1 έως 2 m ψηλότερα από το σημερινό επίπεδο του ποταμού Αλφειού. Κατά θέσεις σημειώνονται διακοπή των ιζημάτων της πρώτης φάσης. Οι συνθήκες απόθεσης της δεύτερης φάσης συμφωνούν σημαντικά με τις συνθήκες απόθεσης της πρώτης φάσης.

Τέλος, τα ιζήματα της τρίτης φάσης συνεχίζουν να αποτίθενται μέχρι σήμερα, καθώς αντιστοιχούν στα ιζήματα όπου αποτίθενται στον πυθμένα του ποταμού Αλφειού και των παραποτάμων του. Κατά τους θερινούς μήνες όπου επικρατούν χαμηλές στάθμες, σημαντικό μέρος των αποθέσεων μπορεί να εντοπιστεί ευκολότερα, καθώς βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του νερού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ιζήματα της τελευταίας φάσης είναι τα πιο σύγχρονα, και συνεπώς είναι εμφανή τα σημάδια της επίδρασης του ανθρώπου. Συνεπώς, σε αρκετές περιπτώσεις οι κώνοι κορημάτων όπου συναντώνται κυρίως σε ασβεστολιθικά πρηνή αποτελούν προϊόντα χημική και μηχανικής αποσάθρωσης.

2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

2.4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΓΝΙΤΗ

Ο λιγνίτης ανήκει στην κατηγορία των στερεών ορυκτών καυσίμων, και χρησιμοποιείται ως καύσιμη ύλη στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς. Η προέλευση του είναι οργανική, η περιεκτικότητά του σε άνθρακα είναι χαμηλότερη από του λιθάνθρακα και υψηλότερη από της τύρφης. Ο λιγνίτης προέρχεται από την ενανθράκωση φυτικών οργανισμών, μια ιδιότυπη αποσύνθεση τους. Η εξόρυξη του πραγματοποιείται είτε με ανοικτά ορύγματα, είτε σε ορυχεία. Ο αριθμός και το πάχος των λιγνιτικών στρωμάτων στις λεκάνες σχηματισμού διαφέρουν σημαντικά. Ενδεικτικά, το πάχος των λιγνιτικών στρωμάτων Ηωκαινικής ηλικίας είναι μικρότερο, συγκριτικά με το πάχος στρωμάτων λιγνίτη μεταγενέστερης ηλικίας. Από περιβαλλοντική άποψη, η καύση λιγνίτη για την παραγωγή ενέργειας αποτελεί σημαντικό ζήτημα, καθώς εκλύονται ραδιοχημικά συστατικά (Harrison and Jones, 1995). Γενικότερα, αρκετές περιοχές με λιγνιτικά κοιτάσματα στον Ελληνικό χώρο έχουν μελετηθεί πετρογραφικά και ορυκτολογικά (Kalaitzidis et al., 2004; Papanicolaou et al., 2004; Antoniadis et al., 2006).

2.4.2 ΛΙΓΝΙΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Η παρουσία λιγνιτικών κοιτασμάτων στη περιοχή της Μεγαλόπολης είναι γνωστή από την αρχαιότητα. Σύμφωνα με αναφορές του Πausανία (2ος αιώνας μ.Χ.), έχουν σημειωθεί φαινόμενα αυτανάφλεξης σε περιοχή κοντά στην κοίτη του Αλφειού, τα οποία οφείλονταν σε αυτανάφλεξη λιγνίτη.

Κατά την διάρκεια του 20ου αιώνα, σημειώθηκαν αρκετές ιδιωτικές προσπάθειες μελέτης και εξόρυξης εμφανίσεων λιγνίτη, κοντά στη κοίτη του Αλφειού. Οι προσπάθειες αυτές επικεντρώνονταν κυρίως σε θέσεις όπου οι συνθήκες ήταν ευνοϊκές και η εκμετάλλευση γρήγορη. Παρόλα αυτά, μέχρι την δεκαετία του 1950 δεν σημειώθηκαν προσπάθειες συστηματικής έρευνας στη περιοχή, καθώς στην πλειοψηφία των προγενέστερων προσπαθειών εντοπιζόταν λιγνίτης χαμηλής ποιότητας. Συνεπώς, η πρώτη σημαντική προσπάθεια διερεύνησης των λιγνιτικών εμφανίσεων στη λεκάνη της Μεγαλόπολης πραγματοποιήθηκε με πρωτοβουλία του Ινστιτούτου Γεωλογίας και Υπεδάφους (Ι.Γ.Ε.Υ). Η μελέτη αυτή παρουσίασε ενθαρρυντικά αποτελέσματα για μελλοντικές έρευνες (Μαρίνος κ.α., 1959). Οι λιγνιτικές εμφανίσεις στην λεκάνη της Μεγαλόπολης αποτελεί τη μία από τις δύο κυριότερες θέσεις εξόρυξης λιγνίτη στον Ελλαδικό χώρο (Rouni et al., 2001).

Η πραγματοποίηση της κύριας ερευνητικής δραστηριότητας στο περιοχή του Χωρεμίου είχε ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό 228 Mt αποθέματος λιγνίτη. Παράλληλα, στις περιοχές της Καρύταινας, Θωκνιάς και Κυπαρισσίων εντοπίστηκαν 8 Mt, 70 Mt και 128 Mt αντίστοιχα. Το έτος 1969 ξεκίνησε η εκμετάλλευση του κοιτάσματος στο πεδίο Θωκνιάς (Siavalas et al., 2009), όπου πλέον τα αποθέματα του έχουν πλήρως εξαντληθεί. Την περίοδο αυτή, η εξόρυξη των λιγνιτικών κοιτασμάτων συνεχίζεται στα πεδία Χωρεμίου, Κυπαρισσίων και Μαραθούσας. Η ετήσια παραγωγή λιγνίτη αυξήθηκε σταδιακά από 4,1 εκατ. τόνους το έτος 1971, σε 14,5 εκατ. τόνους το έτος 2002. Τα επίπεδα παραγωγής διατηρήθηκαν στο ύψος των 13-14 εκατ. τόνων ετησίως έως το έτος 2008, όπου ξεκίνησε η σταδιακή πτώση της ετήσιας παραγωγής. Κατά τη περίοδο 2015-2019, η παραγωγή κυμάνθηκε σε επίπεδα 6-8 εκατ. τόνων ετησίως. Τέλος, το έτος 2020 η παραγωγή λιγνίτη όπου σημειώθηκε στα ορυχεία Μεγαλόπολης ανήλθε στους 2,8 εκατ. τόνους.

Σύμφωνα με τον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό 2000, καθώς και με το Χάρτη Σεισμικής Επικινδυνότητας που τροποποιήθηκε με τη ΥΑ17Α/115/9/φν275/7-8-2003, η περιοχή όπου εντοπίζεται η εκμετάλλευση κατατάσσεται στη ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II, δηλαδή ασθενούς σεισμογενής περιοχή. Η μέγιστη οριζόντια σεισμική επιτάχυνση του εδάφους (A), δίνεται από τη σχέση $A = a * g$, όπου a είναι η εδαφική επιτάχυνση ανηγμένη στην επιτάχυνση της βαρύτητας g . Για τη Ζώνη II, $a=0,24$ και συνεπώς η μέγιστη σεισμική επιτάχυνση εδάφους είναι $A = 0,24 g$.

Ο λιγνίτης της Μεγαλόπολης διαθέτει χρώμα σκούρο καφέ έως μαυρό. Το ειδικό του βάρος κυμαίνεται μεταξύ 1.100 και 1.200 Kg/m³, ενώ στη φυσική του μορφή εντοπίζεται υγρασία σε ποσοστό 60% και τέφρα σε ποσοστό 15%. Αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των λιγνιτικών κοιτασμάτων στη Μεγαλόπολη είναι η χαμηλή τους θερμαντική ικανότητα. Η θερμαντική ικανότητα του λιγνίτη αποτελεί μία από τις βασικές παραμέτρους του βαθμού ενανθράκωσης του. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ήταν η πρώτη φορά όπου έγινε χρήση λιγνίτη με τόσο χαμηλή θερμαντική ικανότητα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μέση θερμαντική ικανότητα του λιγνίτη είναι 9,3 MJ/Kg, ενώ κυμαίνεται μεταξύ 8 και 11 MJ/Kg.

Πεδίο Εκμετάλλευσης Χωρεμίου

Το πεδίο Χωρεμίου αποτελεί το μεγαλύτερο λιγνιτικό πεδίο από άποψη αποθεμάτων στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης. Στο πεδίο Χωρεμίου συναντάται ο σχηματισμός Μαραθούσας, του οποίου το πάχος ανέρχεται στα 200 m, και τα στρώματα λιγνίτη παρουσιάζουν την μεγαλύτερη εξάπλωση τους. Σύμφωνα με τους Lönhert and Nowak (1965), στο πεδίο εντοπίζονται τρεις λιγνιτικοί ορίζοντες.

Παρόλα αυτά, σύμφωνα με νεότερες έρευνες (Sakorafa & Michailidis, 1997) αναφέρεται η παρουσία εννέα λιγνιτικών στρωμάτων, συνολικού πάχους 45 m, εκ των οποίων τα τέσσερα στρώματα παρουσιάζουν σημαντικό πάχος και οικονομική σημασία.

Η εκμετάλλευση του λιγνιτικού κοιτάσματος πραγματοποιείται με ορθές βαθμίδες, ενώ η απαίτηση για εκλεκτική εξόρυξη και υψηλή παραγωγή, καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των διαφόρων σχηματισμών οδήγησαν στην επιλογή της συνεχούς μεθόδου εκσκαφής-μεταφοράς-απόθεσης.

Πεδίο Εκμετάλλευσης Κυπαρισσίων

Το πεδίο Κυπαρισσίων αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο λιγνιτικό πεδίο από άποψη αποθεμάτων στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης. Βρίσκεται στο βόρειο τμήμα του Λιγνιτικού Κέντρου, και καταλαμβάνει έκταση 2,7 km² περίπου. Το ανώτερο λιγνιτικό στρώμα δεν εμφανίζεται στο πεδίο αυτό.

Πεδίο Εκμετάλλευσης Μαραθούσας

Το πεδίο Μαραθούσας βρίσκεται ανάμεσα στα πεδία Χωρεμίου και Κυπαρισσίων, καταλαμβάνοντας συνολική έκταση περίπου 3 km². Οι λιγνιτικοί ορίζοντες όπου συναντώνται στο πεδίο Μαραθούσας είναι τρεις (I, II, III), εκ των οποίων το πάχος των δύο πρώτων (I, II) είναι 7,5-10 m, ενώ το πάχος του τρίτου (III) είναι μεγαλύτερο των 25 m (Αθανασίου κ.ά., 1972).

Ανάμεσα στις λιγνιτικές εμφανίσεις, τα ενδιάμεσα ανόργανα ιζήματα αποτελούνται από εναλλαγές αργίλων και μαργών, ενώ κατά θέσεις εντοπίζονται άμμοι και κροκαλοπαγή. Συνολικά, το μέσο πάχος των λιγνιτικών στρωμάτων στο πεδίο Μαραθούσας είναι περίπου 20 m.

2.4.3 ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Μακροσκοπικά, ο λιγνίτης όπου εξορύσσεται στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης παρουσιάζει είτε ανοιχτό, είτε σκούρο καστανό χρώμα, ενίοτε μαύρο, και εντοπίζεται έντονη παρουσία φυτικών υπολειμμάτων. Τέλος, συχνά στις επαφές του με ανόργανα ιζήματα εντοπίζονται απολιθώματα. Οι κυριότεροι λιθότυποι λιγνίτη όπου συναντάται στην Μεγαλόπολη είναι ο matrix και ο ορυκτομιγής (I.C.C.P. 1993).

Ταυτόχρονα, η περιεκτικότητα του λιγνίτη σε υγρασία και πτητικά συστατικά είναι καθοριστική για τις εφαρμογές και τις χρήσεις του. Ένας από τους κυριότερους δείκτες της περιεκτικότητας του λιγνίτη σε ανόργανα συστατικά είναι η τέφρα. Η περιεκτικότητα σε τέφρα καθορίζει την ποιότητα και τις περιβαλλοντικές εφαρμογές του λιγνίτη (Diessel, 1992).

Όσον αφορά την περιεκτικότητα του λιγνίτη σε μόνιμο άνθρακα, η μέση τιμή είναι της τάξεως του 26,1%, ενώ κυμαίνεται από 20 έως 32,7% (Μαρίνος κ.ά. 1959). Οι τιμές περιεκτικότητας του λιγνίτη όπου εξορύσσεται από το πεδίο Χωρεμίου σε μόνιμο άνθρακα κυμαίνονται μεταξύ 6,5-34,9%, και η μέση περιεκτικότητα είναι της τάξεως του 19,5% (Sakorafa and Michailidis 1997).

Αντίστοιχα, η περιεκτικότητα σε τέφρα σε ξηρές συνθήκες κυμαίνεται μεταξύ 21,7 % και 47,7 %, ενώ η μέση περιεκτικότητα σε τέφρα στο Λιγνιτικό Κέντρο Μεγαλόπολης είναι 32,6%. Πιο συγκεκριμένα, ο λιγνίτης του πεδίου Χωρεμίου παρουσιάζει μέση περιεκτικότητα σε τέφρα 36,7%, ενώ οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 10,7% και 66% (Sakorafa and Michailidis 1997).

Επίσης, η περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά αναφέρονται σε δείγματα σε ξηρές συνθήκες, όπως και στην περίπτωση της τέφρας. Η μέση περιεκτικότητα σε τέφρα όλων των λιγνιτικών εμφανίσεων του κοιτάσματος της Μεγαλόπολης είναι της τάξεως του 42,1 %, ενώ οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 29,4% και 46,5%. Όσον αφορά το πεδίο Χωρεμίου, η μέση περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά είναι 43,7%, ενώ οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 29,8% και 54,3% (Sakorafa and Michailidis 1997).

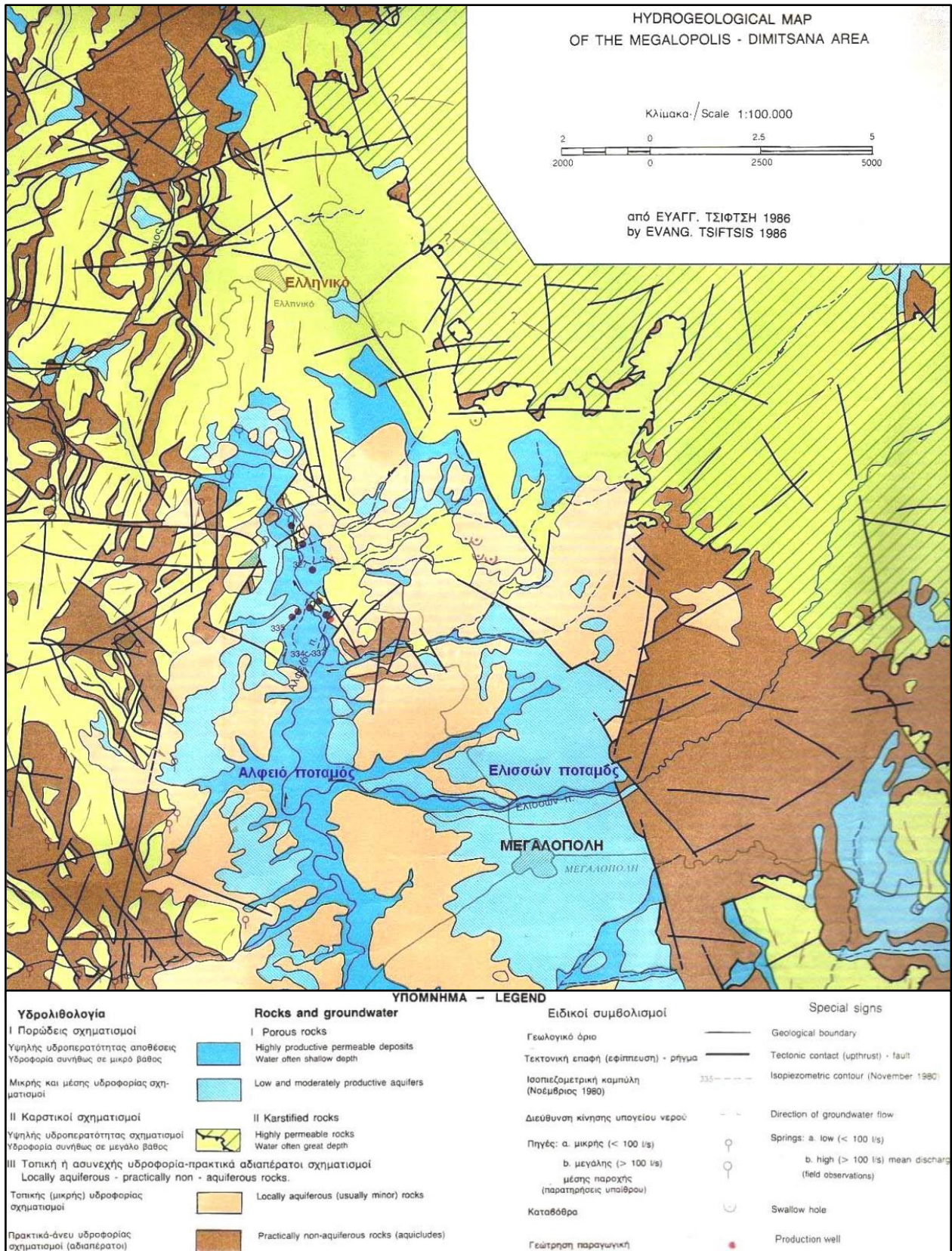
Τέλος, η περιεκτικότητα του λιγνίτη Μεγαλόπολης σε αρχική υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 48% και 65%, ενώ η μέση αρχική υγρασία είναι της τάξεως του 59,3% (Μαρίνος κ.ά. 1959). Όσον αφορά την μέση αρχική υγρασία του λιγνίτη στο πεδίο Χωρεμίου είναι 53,3%, ενώ οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 41,7% και 59,3%.

2.5 ΥΔΡΟΛΙΘΟΛΟΓΙΑ ΛΕΚΑΝΗΣ ΜΕΓΑΛΟΠΟΛΗΣ

Η υδρολιθολογική κατάσταση των πετρωμάτων είναι η ιδιότητα όπου διαθέτουν τα πετρώματα στο να επιτρέπουν ή όχι την κίνηση του νερού εντός της μάζας τους, και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη υπόγειων ταμιευτήρων νερού. Τα πετρώματα με το πορώδες είτε πρωτογενές, είτε ως δευτερογενές όπου μπορεί να αναπτύσσουν στη μάζα τους, είναι σημαντική παράμετρος φυσικά, γιατί μόνο τα πετρώματα με πορώδες μπορούν να αποθηκεύσουν στους κενούς αυτούς χώρους ποσότητα ύδατος.

Οι σχηματισμοί όπου συναντώνται στη λεκάνη της Μεγαλόπολης και την περιοχή γύρω από αυτή μπορούν να ταξινομηθούν. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τους μεταλλικούς σχηματισμούς και νεογενείς αποθέσεις όπου συναντώνται στην λεκάνη, και χαρακτηρίζονται ως κοκκώδεις. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται οι προ-αλπικοί και αλπικοί σχηματισμοί, των ενοτήτων Πίνδου και Γαβρόβου-Τριπόλεως. Η δεύτερη κατηγορία μπορεί να κατηγοριοποιηθεί περαιτέρω στους καρστικοποιημένους σχηματισμούς υψηλής περατότητας και στους αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Στον υδρογεωλογικό χάρτη (Εικόνα 16) (απόσπασμα από το χάρτη του Ι.Γ.Μ.Ε. υπό Τσιφτσή Ε. 1986) οι γεωλογικοί σχηματισμοί διαχωρίζονται σε πέντε κατηγορίες σύμφωνα με την υδροπερατότητα τους (πορώδης έως πρακτικά αδιαπέρατος). Οι υψηλής υδροφορίας αποθέσεις μικρού βάθους και οι μικρής έως μέσης υδροφορίας αποθέσεις αποτελούν τις δύο πρώτες κατηγορίες, και συναντώνται στην περιοχή της λεκάνης. Η τρίτη κατηγορία αφορά τους καρστικούς σχηματισμούς όπου συναντώνται στη περιοχή, κυρίως οι ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου, ηλικίας Άνω Κρητιδικού και τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας Τρίπολης. Η τέταρτη κατηγορία αναφέρεται στους συνεκτικούς σχηματισμούς, όπου οι αναπτυσσόμενοι υδροφόροι ορίζοντες είναι περιορισμένης έκτασης, ή δεν είναι συνεχείς. Τέλος, η πέμπτη κατηγορία σχηματισμών περιλαμβάνει εκείνους, οι οποίοι θεωρούνται πρακτικά αδιαπέρατοι και δεν εντοπίζεται υδροφορία.



Εικόνα 16. Υδρογεωλογικός χάρτης Μεγαλόπολης – Δημητσάνας (Γεωτεκτονικός-Υδρογεωλογικός Χάρτης ΙΓΜΕ), (Τσιφτσής 1986).

Μη συνεκτικοί σχηματισμοί - Αποθέσεις μικρής έως μέσης υδροφορίας

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται οι αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως υδροπερατοί σε περιορισμένη έκταση. Η περιορισμένη υδροφορία των αλλουβιακών αποθέσεων στην υψηλή παρουσία αργίλου εντός των αμμούχων αποθέσεων με διασκορπισμένες κροκάλες, με αποτέλεσμα την τοπική μείωση της περατότητας των αποθέσεων. Επομένως, οι υδροφόροι ορίζοντες όπου αναπτύσσονται είναι περιορισμένης παραγωγικής ικανότητας.

Παράλληλα, στη κατηγορία αυτή συγκαταλέγονται οι κώνοι κορημάτων ασβεστολιθικής σύστασης, με τοπική παρουσία αργίλου. Τα κορήματα όπου αποτελούνται από ασβεστολιθικούς χάλικες εμφανίζουν αυξημένο βαθμό υδροπερατότητας, ενώ τα πλευρικά κορήματα συνήθως παρουσιάζουν χαμηλότερο βαθμό υδροπερατότητας.

Στους μη συνεκτικούς σχηματισμούς περιλαμβάνονται τα χονδρόκοκκα υλικά των αναβαθμίδων όπου αποτίθενται από το ποτάμιο σύστημα, με συμμετοχή άλλων κλαστικών υλικών ποικίλου μεγέθους και προέλευσης. Στη περίπτωση αυξημένης αναλογίας αργιλικού υλικού, η υδροπερατότητα των σχηματισμών αυτών επίσης μειώνεται.

Τα στρώματα Μαραθούσας, Απιδίτσας και οι σχηματισμοί Τριλόφου, Μακρυσίου συνίστανται από αργίλους, μάργες λιμναίας φάσης με εναλλαγές λιγνιτικών ενστρώσεων και ελαφρά συνεκτικά κροκαλοπαγή. Οι σχηματισμοί αυτοί θεωρούνται στο σύνολο τους αδιαπέρατοι και χαρακτηρίζονται από χαμηλό συντελεστή υδροπερατότητα K , της τάξεως $K=10^{-6}-10^{-9}$ m/sec, τιμές οι οποίες προέκυψαν από σχετικές δοκιμές (Intergeo, 2000). Μετά το πέρας της εκμετάλλευσης στη περιοχή μελέτης, δεν αναμένεται εισροή νερού στους σχηματισμούς όπου συναντώνται στα ανοικτά πρανή.

Στους οικισμούς πλησίον της υπό εκμετάλλευση περιοχής δεν εντοπίζονται γεωτρήσεις για αρδευτικούς ή υδρευτικούς σκοπούς, ώστε να αποδεικνύεται ότι οι παραπάνω σχηματισμοί εμφανίζουν μικρής ή μέσης τάξεως υδροφορία.

Καρστικοποίηση

Το φαινόμενο της καρστικοποίησης συναντάται συχνά σε περιοχές, οι οποίες δομούνται από ευδιάλυτα ανθρακικά πετρώματα, και το οποίο φαινόμενο προκαλεί ιδιαίτερα μορφολογικά γνωρίσματα και επηρεάζει τον τρόπο εκφόρτισης των υπόγειων υδάτων (Ευελπίδου, 2018). Η διαλυτότητα όπου παρουσιάζουν τα ανθρακικά πετρώματα στο νερό, το δίκτυο ασυνεχειών και οι τεκτονικές διεργασίες όπου σημειώθηκαν στη περιοχή μελέτης, η πίεση και η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς και το διαθέσιμο νερό στη περιοχή αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες όπου επηρεάζουν το φαινόμενο της καρστικοποίησης (Herak & Stringfield, 1972, Jennings, 1985). Η τεκτονική δραστηριότητα μίας περιοχής και η λιθολογία των πετρωμάτων αποτελούν τον γεωλογικό παράγοντα, καθορίζοντας την γεωμετρία των καρστικών μορφών. Η παρουσία νερού, οι συνθήκες ροής αυτού και η διαλυτική του ικανότητα αποτελούν εξίσου σημαντικούς παράγοντες, οι οποίοι αφορούν περισσότερο την γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης (Häuselmann et al., 1999).

Η διάλυση και η διεύρυνση των καρστικών μορφών γενικότερα εξελίσσονται προς δύο κύριες κατευθύνσεις. Η πρώτη διεύθυνση είναι παράλληλα στην επιφάνεια κορεσμού, κάτω από αυτή και η δεύτερη είναι κάθετα στην επιφάνεια κορεσμού (Burdon, 1965). Η διαλυτική δράση των υπόγειων υδάτων είναι εντονότερη στο ανώτερο τμήμα της ζώνης κορεσμού, και με αύξηση του βάθους η διαλυτική δράση εξασθενεί.

Η τεκτονική δραστηριότητα και οι τεκτονικές δομές αποτελούν ένα κομβικούς παράγοντες για την δημιουργία ενός καρστικού περιβάλλοντος και την εξέλιξη του φαινομένου (Shanon & Kostov, 2014) και συχνά αποτελούν προϋπόθεση για τον σχηματισμό των καρστ. Συνεπώς, η διαπερατότητα ενός ανθρακικού σχηματισμού όπως οι ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου και οι ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Τρίπολης οφείλεται σημαντικά στην ύπαρξη δικτύου ασυνεχειών εντός της βραχόμαζας (Lu et al., 2014).

Καρστικοί σχηματισμοί Λεκάνης Μεγαλόπολης

Οι ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου, ηλικίας Άνω Κρητιδικού και οι ανθρακικοί σχηματισμοί της ενότητας Τρίπολης αποτελούν τους κυριότερους σχηματισμούς στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης και αναπτύσσονται καρστικοί υδροφορείς. Οι ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου καταλαμβάνουν σημαντική έκταση στη περιοχή μελέτης, και είναι επωθημένοι πάνω στο φλύσχη της ενότητας Τριπόλεως, ή έχουν επωθηθεί πάνω στον πρώτο φλύσχη της ενότητας Πίνδου. Οι φλυσχικοί σχηματισμοί και στις δύο περιπτώσεις θεωρούνται πρακτικά αδιαπέρατοι, υδατοστεγανοί. Η τεκτονική επαφή μεταξύ των δύο σχηματισμών έχει οδηγήσει στον σχηματισμό πολλαπλών καρστικών συστημάτων στη περιοχή της λεκάνης (Τσιφτσής, 1986).

Αντίθετα με τα υπάρχοντα δεδομένα για την ενότητα Τρίπολης, η έναρξη της καρστικοποίησης στην ενότητα της Πίνδου, εκκίνησε μετά το πέρας των ορογενετικών κινήσεων, περίοδος όπου μεταπίπτει οριστικά σε ξηρά. Η ορογένεση και η πτύχωση των σχηματισμών έχει πιθανότατα ολοκληρωθεί κατά το Κατώτερο Μειόκαινο.

Μετά το τέλος των επαπτομενικών κινήσεων, ξεκίνησε η διαμόρφωση του αναγλύφου, όπου σε περιοχές που επικρατούσαν οι κλιματικοί παράγοντες είναι εντονότερο το φαινόμενο της χημικής αποσάθρωση, ενώ σε περιοχές όπου επικρατούσαν οι τεκτονικοί παράγοντες, είναι εντονότερο το φαινόμενο της μηχανικής διάβρωσης. Λόγω της χημικής και μηχανικής αποσάθρωσης σχηματίστηκαν οι κοιλάδες, με αποτέλεσμα τη διάβρωση των επιφανειακών στρωμάτων και την αποκάλυψη των βαθύτερων σημείων. Στα τμήματα της περιοχής, τα οποία δεν έχουν προσβληθεί έντονα από τη διάβρωση, συνεχιζόταν η καρστικοποίηση, η οποία προχώρησε μέχρι το υδατοστεγές υπόβαθρο, ο σχηματισμός του "πρώτου φλύσχη", εφ' όσον δεν έχει διαταραχθεί η στρωματογραφική συνέχεια.

Η κίνηση του νερού υπόγεια μέσα στους ασβεστόλιθους πιθανότατα είναι γραμμική, γεγονός όπου οφείλεται στις σχετικά μεγάλες μέσες κλίσεις των στρωμάτων και η κίνηση αυτή ολοκληρώνεται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα.

Συνεπώς, οι υπόγειοι καρστικοί αγωγοί είναι μεμονωμένοι και η κίνηση σήμερα των υπόγειων υδάτων, είναι γραμμική, η δε εκφόρτιση τους σχεδόν σημειακή με την εκδήλωση πλήθους πηγών.

Στη περίπτωση όπου ο σχηματισμός των ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων συναντάται επιφανειακά παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός καρστικού τύπου μακροπερατού σχηματισμού (Μαριολάκος, 1976).

Στο βόρειο, ανατολικό και νότιο τμήμα της λεκάνης, το καρστικό σύστημα όπου αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών πετρωμάτων της ενότητας Τρίπολης εντοπίζεται σε μεγαλύτερο βάθος από τα αντίστοιχα καρστικά συστήματα όπου αναπτύσσονται εντός των ασβεστόλιθων της ενότητας Πίνδου.

Στο βόρειο τμήμα της λεκάνης συναντώνται οι ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου, από τους οποίους απορρέει νερό μέσω καρστικών πηγών, ενώ σημαντική ποσότητα νερού κατεισδύει σε χαμηλότερο σύστημα καρστικού υδροφορέα εντός των ανθρακικών πετρωμάτων της ενότητας Τρίπολης. Συνεπώς, η υδρογεωλογική κατάσταση σε αυτή την θέση της λεκάνης είναι περίπλοκη, χάρη στη τεκτονική δομή της περιοχής.

Στο ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, οι ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου είναι επωθημένοι πάνω στο φλύσχη της ενότητας Τρίπολης, και τα υπόγεια ύδατα εκφορτίζονται μέσω πηγών. Τέλος, στο δυτικό τμήμα της λεκάνης, καρστικοί υδροφόροι ορίζοντες αναπτύσσονται εντός των ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων της ενότητας Πίνδου και εκφορτίζονται μέσω καρστικών πηγών (Δημητρούκας Ν., 2003).

Το σύστημα υδροφορέων όπου αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών πετρωμάτων της ενότητας Τρίπολης εκφορτίζονται μέσω παράκτιων και υποθαλάσσιων πηγών μεγάλης παροχής, οι οποίες συναντώνται στη περιοχή του Άργους, στα βόρεια και βορειοανατολικά της Καλαμάτας. Επίσης, σημαντικό ποσοστό των υπόγειων υδάτων εκφορτίζεται μέσω πηγών υψηλής παροχής στα βόρεια της λεκάνης.

Παράλληλα, από τα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας Τρίπολης εκφορτίζεται μία πηγή περιορισμένης παροχής. Η πηγή αυτή προκύπτει από την επαφή μεταξύ των ανθρακικών πετρωμάτων και των στρωμάτων Τυρού, πλησίον της περιοχής Καράτουλας. Επίσης, στην περιοχή Καράτουλας-Λυκόχειας συναντάται η επαφή των στρωμάτων Τυρού με τους σχηματισμούς του υποβάθρου, την φυλλιτική-χαλαζιτική σειρά (Ανώτερο Παλαιοζωικό-Κατώτερο Τριαδικό).

Συμπερασματικά, η επαφή μεταξύ των ανωκρητιδικών ασβεστόλιθων της ενότητας Πίνδου και του υποκείμενου πρώτου φλύσχη της ενότητας (Κενομάνιο) οδηγεί σε εκφόρτιση των υπόγειων υδάτων είτε μέσω πηγών επαφής, είτε μέσω πηγών υπερχείλισης στη περίπτωση όπου παρατηρούνται εφιπτεύσεις του φλύσχη πάνω στους ασβεστόλιθους. Σε ορισμένες περιπτώσεις εντοπίζονται πηγές υπερχείλισης στην επαφή των ασβεστόλιθων με τις επιφανειακές αποθέσεις της λεκάνης. Οι ασβεστόλιθοι της ενότητας Πίνδου οριοθετούν σε σημαντικό βαθμό την περιοχή εκμετάλλευσης και των ορυχείων, καθώς και το υπόβαθρο της. Συνεπώς, οι υδροφορείς όπου αναπτύσσονται εντός αυτού του σχηματισμού επηρεάζουν την εκμετάλλευση άμεσα.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο τρίτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία ανασκόπηση των διαφόρων μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας των πρανών. Αρχικά, γίνεται αναφορά στις μεθόδους Οριακής Ισορροπίας (LEM), ενώ στην συνέχεια πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στο ρόλο των αριθμητικών αναλύσεων στον υπολογισμό της ευστάθειας και των μετακινήσεων. Τέλος, παρουσιάζεται η χρησιμότητα του λογισμικού Plaxis 2D στην προσομοίωση γεωτεχνικών συνθηκών, με το οποίο εκτελέστηκαν οι αριθμητικές αναλύσεις του τέταρτου κεφαλαίου.

3.2 ΚΑΤΑΝΟΗΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

Η κατανόηση των γεωτεχνικών συνθηκών όπου επικρατούν σε μία περιοχή αποτελεί κυρίαρχο ζήτημα κάθε μελέτης ενός τεχνικού έργου. Συνεπώς, η ανάλυση της ευστάθειας του πρανού σε μία υπαίθρια εκμετάλλευση αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα του έργου (Xiao-Liang et al., 2021). Είναι αναγκαίο το προσωπικό να εργάζεται σε ασφαλείς συνθήκες, και σε περιπτώσεις όπου σημειώνεται υπόνοια αστοχίας του γεωλογικού σχηματισμού, ή των μέτρων υποστήριξης απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της απόκρισης τους.

Στη γεωτεχνική μηχανική, η ανάλυση ευστάθειας χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του μέγιστου φορτίου όπου μπορεί να υποστηριχθεί από έναν γεωλογικό σχηματισμό ή μία δομή χωρίς να προκληθεί αστοχία. Το μέγιστο φορτίο, το οποίο είναι επίσης γνωστό ως οριακό φορτίο, μπορεί να είναι χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου διαιρώντας το κατά έναν προκαθορισμένο συντελεστή ασφαλείας (Sloan, 2013b). Ο συντελεστής ασφαλείας (Factor of Safety) ενός πρανού περιγράφεται ως ο παράγοντας με τον οποίο διαιρείται η αντοχή του σχηματισμού, ώστε το υπό εξέταση πρανές να φθάσει σε οριακή κατάσταση ισορροπίας και στα όρια αστοχίας (Duncan, 1996). Κατ' επέκταση, ο συντελεστής ασφαλείας (FS) ορίζεται ως το πηλίκο της διατμητικής αντοχής του σχηματισμού προς τις διατμητικές τάσεις όπου ασκούνται στον σχηματισμό:

$$FS = \frac{\text{Διατμητική Αντοχή Σχηματισμού}}{\text{Ασκούμενες Τάσεις}}$$

Όταν το πηλίκo του συντελεστή ασφαλείας είναι μικρότερο της μονάδας, δηλαδή $FS < 1$, τότε το πρανές θεωρείται ότι αστοχεί. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου το πηλίκo είναι μεγαλύτερο της μονάδας, δηλαδή $FS > 1$, θεωρείται δεν υπάρχει κίνδυνος αστοχίας και η διατμητική αντοχή του σχηματισμού είναι μεγαλύτερη των ασκούμενων τάσεων επί του πρανούς. Τέλος, στην περίπτωση όπου ο συντελεστής ασφαλείας είναι ίσος με την μονάδα ($FS = 1$), τότε θεωρείται ότι υπάρχει οριακή κατάσταση ευστάθειας.

Οι βασικότεροι παράγοντες όπου επιδρούν στην ευστάθεια του πρανούς είναι η γεωμετρία του πρανούς, οι μηχανικές ιδιότητες του σχηματισμού και τα υπάρχοντα συστήματα ασυνεχειών (Hammouri et al., 2008). Η αστοχία όπου εκδηλώνεται στο πρανές μπορεί να συμβεί είτε βίαια χωρίς προγενέστερη ένδειξη, είτε σταδιακά και ελεγχόμενα σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Pasternack & Shi-Hang, 1988).

Γενικότερα, έχει προταθεί πληθώρα μεθόδων ανάλυσης ευστάθειας των πρανών (Cheuk et al., 2005; Rong et al., 2019b; Yuan et al., 2020), οι οποίες χωρίζονται στις παραδοσιακές μεθόδους ανάλυσης και στις αριθμητικές αναλύσεις (Chen et al., 2021). Στο παρελθόν, οι αναλύσεις ευστάθειας του πρανούς εκτελούνταν κυρίως με την χρήση της μεθόδους οριακής ισορροπίας (LEM) όπως η μέθοδος Fellenius (Fellenius, 1936), την τροποποιημένη μέθοδο του Bishop (Bishop, 1955), τη μέθοδο του Janbu (Janbu, 1968), τη μέθοδο των Morgenstern και Price (Morgenstern & Price, 1965) και τη μέθοδο του Spencer (Spencer, 1967).

Ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας χωρίς απαραίτητα την γνώση των αρχικών συνθηκών του πρανούς, καθώς και της σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων του εδάφους αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό αυτών των μεθόδων.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΡΙΑΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ (LEM)

Οι Μέθοδοι Οριακής Ισορροπίας επικεντρώνονται στον υπολογισμό του συντελεστή ασφαλείας των πρανών υπό στατικές συνθήκες. Η ανάλυση της ευστάθειας βασίζεται στο κριτήριο του Mohr-Coulomb και αναλύει τη σταθερότητα ενός πρανού σε δύο διαστάσεις.

Συνεπώς, οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας απαιτούν λιγότερο χρόνο για την ανάλυση ευστάθειας των πρανών. Απαιτούνται κάποιες παραδοχές, καθώς η ανάλυση αρχικά οφείλει να καθοριστεί στατικά, εφόσον οι γνωστές εξισώσεις δεν επαρκούν για την επίλυση της. Αρχικά, λαμβάνεται υπόψιν ότι το σύστημα των τάσεων είναι δισδιάστατο, καθώς η τρισδιάστατη ανάλυση θα απαιτούσε την επίλυση περίπλοκων μη γραμμικών εξισώσεων. Έτσι, οι τάσεις στην τρίτη διάσταση θεωρούνται μηδενικές.

Ωστόσο, όπως επισημαίνεται από τους Griffiths and Lane (2001) και Griffiths et al. (2009), στις μεθόδους οριακής ισορροπίας απαιτείται η διατύπωση υποθέσεων για το σχήμα της επιφάνεια αστοχίας όπου θα προκύψει (π.χ. κυκλικό) και η θέση των επιφανειών όπου τα πρανή θα αστοχήσουν, οι οποίες σπάνια είναι γνωστές πριν από την ανάλυση, ιδίως όταν λαμβάνεται υπόψη η χωρική μεταβλητότητα των εδαφικών ιδιοτήτων. Υπάρχουν τέσσερις πιθανοί τύποι επιφανειών αστοχίας: επίπεδη ή σφήνα, πολυεπίπεδη, κυκλική και μη κυκλική. Αυτές οι διάφορες μορφές επιφανειών αστοχίας στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά.

Στις κυκλικές επιφάνειες αστοχίας, διακρίνονται τρία είδη, ανάλογα με τη ζώνη επιρροής τους. Η πρώτη καλείται αστοχία μετώπου, όπου το κυκλικό μέρος της επιφάνειας αστοχίας εντοπίζεται άνωθεν του πόδα του πρανού. Η δεύτερη αστοχία εντοπίζεται στη βάση του πρανού, όπου το κυκλικό τμήμα της επιφάνειας συναντά το πρανές ακριβώς στο σημείο του ποδός. Τέλος, υπάρχει η αστοχία βάσης, όπου το κυκλικό τμήμα της επιφάνειας αστοχίας συναντά το πρανές κάτω από τη βάση του.

Παρά το γεγονός ότι οι μέθοδοι οριακής ισορροπίας προτιμώνται ακόμη και σήμερα από τους μηχανικούς λόγω της ταχύτητας εφαρμογής της, οι μέθοδοι αυτοί παρουσιάζουν το μειονέκτημα ότι δεν λαμβάνουν υπόψιν τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, τις παραμορφώσεις και απαιτούν σημαντικές παραδοχές (Bui et al., 2011b).

3.4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Από την δεκαετία του 1970, έχουν σημειωθεί αλματώδη βήματα στον υπολογισμό της ευστάθειας και των μετακινήσεων χάρη στην εξέλιξη της τεχνολογίας (Duncan, 1996). Πιο συγκεκριμένα, η βελτίωση του σχεδιασμού των λογισμικών και των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών επέτρεψε την εξέλιξη των υπολογιστικών μεθόδων και την χρήση των αριθμητικών αναλύσεων (Hammouri et al., 2008). Οι αριθμητικές αναλύσεις αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο και αξιόπιστο τρόπο επίλυσης γεωτεχνικών ζητημάτων, παρουσιάζοντας μεγάλη αξιοπιστία και πραγματοποιούνται σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (Brinkgreve & Galavi, 2014).

Οι βασικότερες κατηγορίες αριθμητικών αναλύσεων, οι οποίες έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες είναι οι εξής (He et al., 2023):

- α. Η προσομοίωση συνεχούς μέσου, η οποία διατυπώνεται με βάση την κλασσική μηχανική συνεχούς μέσου, συμπεριλαμβάνοντας την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), την μέθοδο συνοριακών στοιχείων (BEM) και την μέθοδο της πεπερασμένης διαφοράς (FDM).
- β. Η προσομοίωση διακριτού μέσου, όπου η βραχομάζα θεωρείται ότι αποτελείται από διακριτούς βραχώδεις όγκους και ασυνέχειες, οι οποίες διαχωρίζουν τα τεμάχια (Fairhurst & Pei, 1990).
- γ. Οι υβριδικές προσεγγίσεις, οι οποίες προτάθηκαν για να εκμεταλλευτούν τόσο τη συνεχή, όσο και την διακριτή προσέγγιση. Η μοντελοποίηση του μετασχηματισμού από συνεχές σε διακριτό μέσο μπορεί να οδηγήσει σε μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της αστοχίας, απαιτώντας έναν ελάχιστον αριθμό παραμέτρων, οι οποίες μπορούν να προσδιοριστούν από τυπικές πειραματικές δοκιμές (Owen et al., 2004).

Οι αριθμητικές μέθοδοι ανάλυσης, όπως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis, FEM), χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ζητήματα γεωτεχνικής μηχανικής για τη μοντελοποίηση της στατικής και δυναμικής απόκρισης των εδαφών και των πετρωμάτων (Brinkgreve & Galavi, 2014). Τα φορτία όπου ασκούνται σε ένα πρανές μπορεί να είναι σταθερά, ή να κινούνται με σταθερή, ή και μεταβλητή ταχύτητα (Katou et al., 2008)

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ευστάθειας του πρανούς, πέρα από τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων. Παράλληλα, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) μπορούν να προσομοιασθούν στα μοντέλα η ετερογενής συμπεριφορά μεταξύ των σχηματισμών, καθώς και η συμπεριφορά των ασυνεχειών μέσω των ιδιοτήτων τους (Sloan, 2013b).

Όταν η μέθοδος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της σταθερότητας υπό στατική φόρτιση, οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν με δύο διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά, μπορούν να εφαρμοσθούν σταδιακά τα φορτία σε προκαθορισμένα βήματα, έως ότου βάσει των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων ο σχηματισμός επέλθει σε κατάσταση κατάρρευσης.

Συνεπώς, κατά την άσκηση του μέγιστου δυνατού φορτίου μπορεί να παραχθεί ένας συντελεστής ασφαλείας όσον αφορά τα φορτία όπου μπορούν να ασκηθούν στην βραχομάζα (Sloan & Randolph, 1982; Sloan, 1982).

Ακόμα, υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης διαδοχικών αναλύσεων, μειώνοντας σε κάθε περίπτωση την αντοχή της βραχομάζας έως ότου η ισορροπία δεν μπορεί πλέον να διατηρηθεί (Zienkiewicz et al., 1975; Dawson et al., 1999; Griffiths & Lane, 2001). Με τη προσέγγιση αυτή, γνωστή ως ανάλυση μείωσης της αντοχής της βραχομάζας, παρακολουθούνται οι παραμορφώσεις και οι μετακινήσεις σε πολλαπλά σημεία ελέγχου στο μοντέλο, και ο συντελεστής ασφαλείας στην περίπτωση αυτή αφορά τα όρια αντοχής της βραχομάζας (Sloan, 2013b).

Κατά την εξέταση της ευστάθειας ενός πρανούς, εάν θεωρηθεί ότι οι σχηματισμοί είναι ελαστικοί-άρτια πλαστικοί, τότε ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να επιλυθεί με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Συγκριτικά με άλλες μεθόδους, όπως η μέθοδος οριακής ισορροπίας (Limit Equilibrium Analysis, LEM), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) υπερτερεί. Αρχικά, κατά την εξέταση των μηχανισμών αστοχίας σε ένα πρανές είναι σημαντική η γνώση του τεμάχους όπου είναι πιθανότερο να ολισθήσει, καθώς και ο προσδιορισμός της επιφάνειας ολίσθησης. Σε αντίθεση με τη μέθοδο FEM, η μέθοδος οριακής ισορροπίας LEM δεν προσφέρει την δυνατότητα εύκολου προσδιορισμού του τεμάχους όπου ολισθεί και της επιφάνειας ολίσθησης (Zheng et al., 2005a). Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, η μέθοδος FEM αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τον εντοπισμό του μηχανισμού αστοχίας (Potts et al., 1990; Matsui & San, 1992c; Oblozinsky et al., 2001; Cai & Ugai, 2003). Κατά δεύτερον, η σταδιακή διαδικασία αστοχίας του πρανούς, η οποία επέρχεται από την απομείωση ορισμένων παραμέτρων της βραχομάζας, μπορεί να παρακολουθείται (Griffiths & Lane, 2001; Faheem et al., 2003). Επομένως, η λήψη των απαραίτητων αποφάσεων και η τοποθέτηση των μέτρων υποστήριξης είναι δυνατή στα στάδια πριν την αστοχία (Griffiths & Lane, 2001). Τέλος, παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με την ευστάθεια του πρανούς πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας, όπως η βροχόπτωση και η επίδραση των υδάτων, μπορούν να ληφθούν υπόψιν στους υπολογισμούς (Zheng et al., 2005a).

3.5 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (PLAXIS 2D)

Η χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων Plaxis 2D (Μέθοδος FEM) προτιμάται στην επίλυση ζητημάτων γεωμηχανικής για τον υπολογισμό της ευστάθειας πρανών σε δισδιάστατα μοντέλα. Κατά την κατασκευή του δισδιάστατου μοντέλου βήμα-βήμα είναι δυνατή η δοκιμή διαφορετικών παραμέτρων, και τελικά η επιλογή της ασφαλέστερης, ή οικονομικότερης απόφασης. Η προσομοίωση με το λογισμικό Plaxis πραγματοποιείται ως μοντέλο δισδιάστατο επίπεδης παραμόρφωσης (plane strain model), είτε ως δισδιάστατο αξονοσυμμετρικό μοντέλο (axisymmetric model) (Brinkgreve R.B.J., 2004).

Γενικότερα, η ευστάθεια ενός πρανού με διαφορετικούς σχηματισμούς είναι πολυπαραγοντική (Sun et al., 2021), και απαιτείται να λαμβάνονται υπόψιν αρκετοί εσωτερικοί και εξωτερικοί παράγοντες (Wang et al., 2017). Οι εσωτερικοί παράγοντες αφορούν κυρίως τις φυσικές και μηχανικές παραμέτρους των σχηματισμών, όπως το ειδικό βάρος, η συνοχή και η εσωτερική γωνία τριβής (Pacheco et al., 2019; B. Yang & Yuan, 2019). Αντίθετα, οι εξωτερικοί παράγοντες είναι αυτοί όπου ελέγχονται ευκολότερα από τον άνθρωπο όπως η κλίση του πρανού, το πλάτος της βαθμίδας και το ύψος της (Yuan et al., 2021a)

Στο λογισμικό Plaxis, η διαδικασία της ανάλυσης διακρίνεται σε τρία κύρια στάδια:

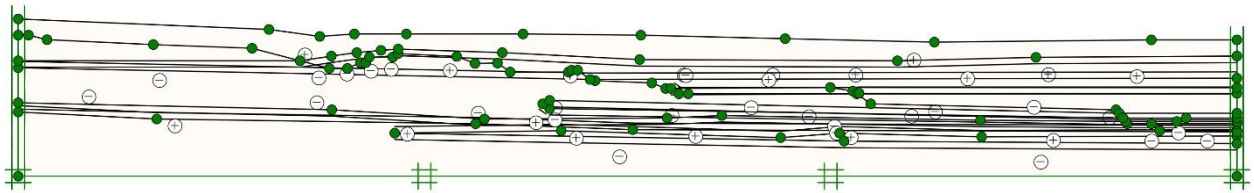
- το στάδιο της προ-επεξεργασίας,
- το στάδιο της ανάλυσης, και
- το στάδιο της μετα-επεξεργασίας.

Παράλληλα, το λογισμικό απαρτίζεται από τέσσερα υπο-προγράμματα, εκ των οποίων τα τρία είναι τα βασικότερα για την διαδικασία της ανάλυσης. Ειδικότερα, τα τέσσερα αυτά υπο-προγράμματα είναι τα εξής:

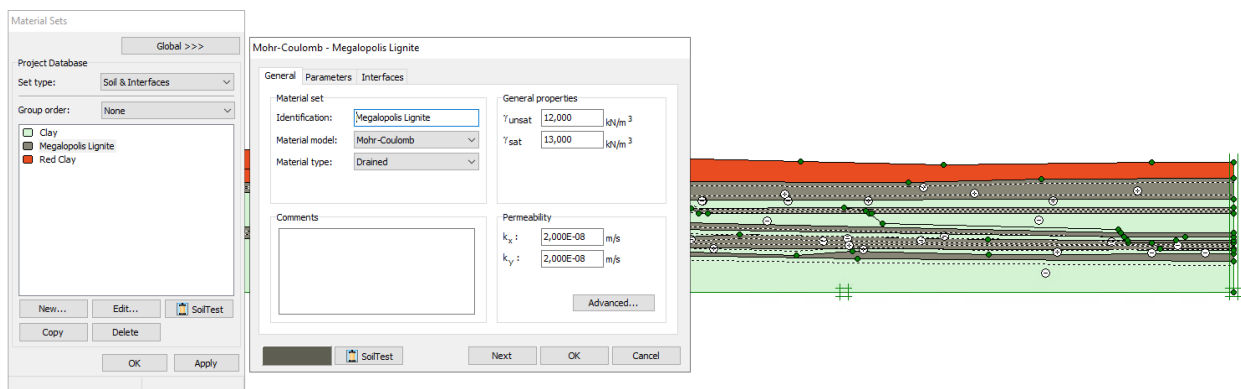
- Plaxis Input,
- Plaxis Calculation,
- Plaxis Output, και
- Plaxis Curves.

Όσον αφορά το πρώτο στάδιο της προ-επεξεργασίας (pre-processing), ο χρήστης ορίζει την γεωμετρία του μοντέλου και τις διαστάσεις του, τις ιδιότητες του υλικού και των μηχανικών χαρακτηριστικών του, ορίζονται οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες, και τέλος τα πεπερασμένα στοιχεία συνδέονται αυτόματα σε πλέγμα (mesh) (Lv et al., 2019). Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται η γεωμετρία του συνεχούς μέσου και ο χρήστης αναθέτει τις ιδιότητες του υλικού στον εκάστοτε σχηματισμό.

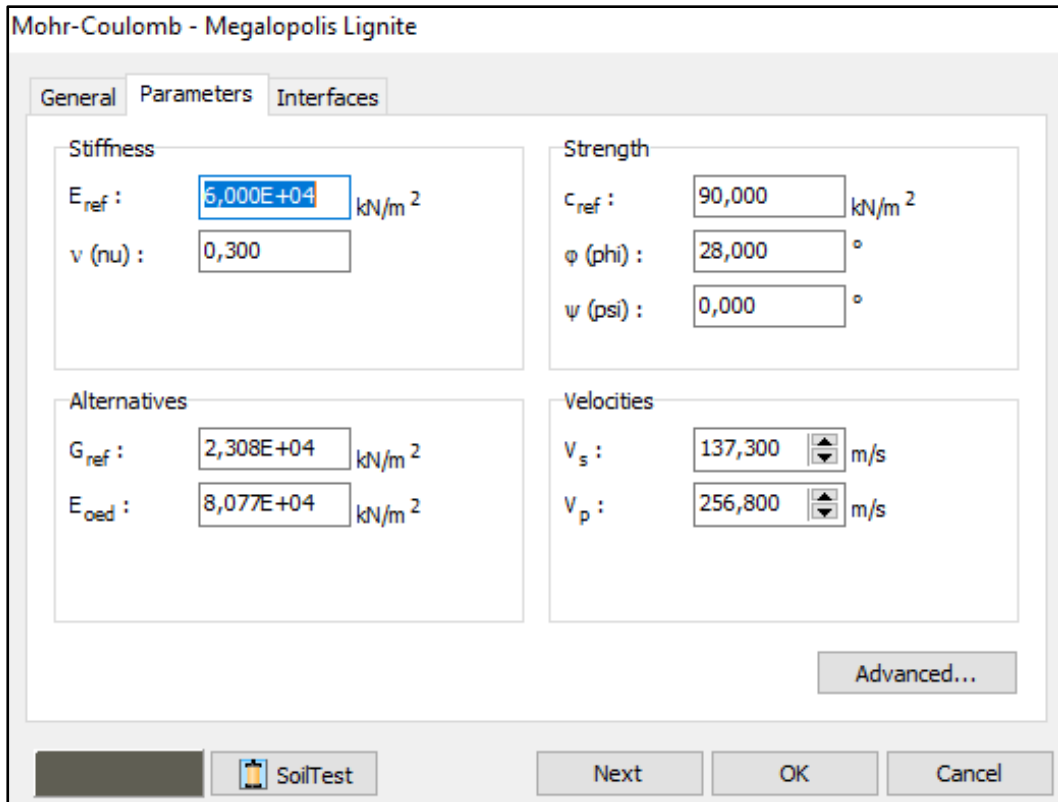
Η πυκνότητα του πλέγματος (mesh) σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την ακρίβεια του αποτελέσματος όπου εξάγεται, καθώς επίσης επηρεάζει τον χρόνο επίλυσης. Παρόλα αυτά, με πύκνωση του πλέγματος του μοντέλου, ο χρόνος επίλυσης αυξάνεται. Η γεωμετρία, οι διαστάσεις και ο αριθμός των κόμβων των στοιχείων όπου αποτελούν το μοντέλων καθορίζει το είδος τους.



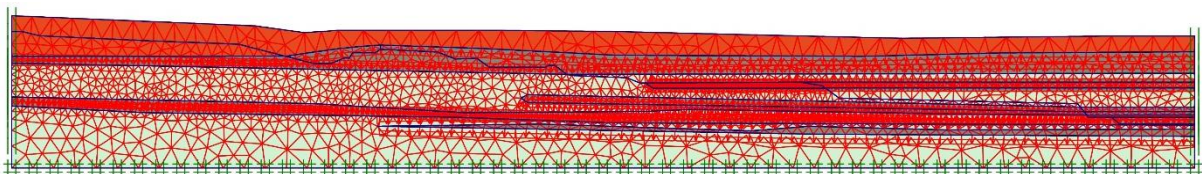
Εικόνα 17. Σχεδιάγραμμα προσομοιώματος κατά την αρχική κατασκευαστική φάση.



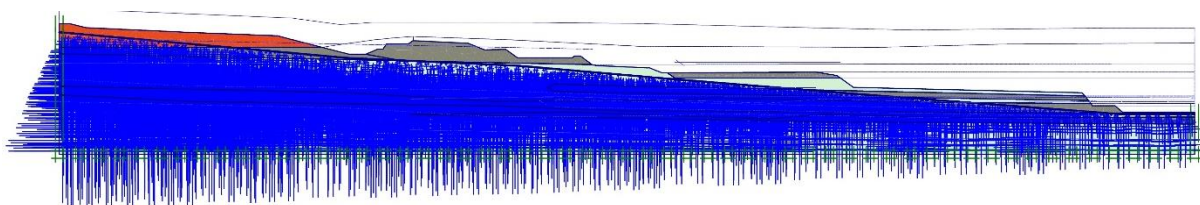
Εικόνα 18. Εισαγωγή της στρωματογραφίας στο προσομοίωμα.



Εικόνα 19. Εισαγωγή των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων ενός εκ των σχηματισμών του προσομιώματος.



Εικόνα 20. Απεικόνιση των πεπερασμένων στοιχείων συνδεδεμένα σε πλέγμα (mesh).

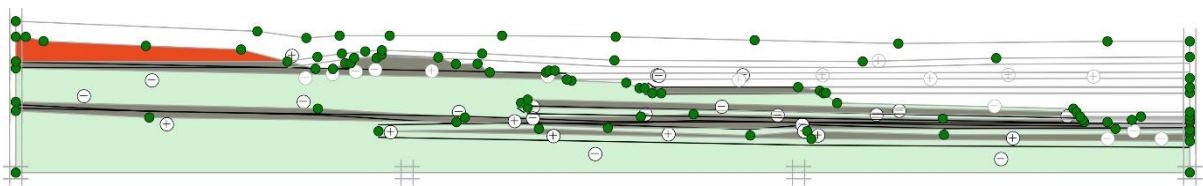


Active pore pressures
 Extreme active pore pressure $-1,12 \cdot 10^3$ kN/m²
 (pressure = negative)

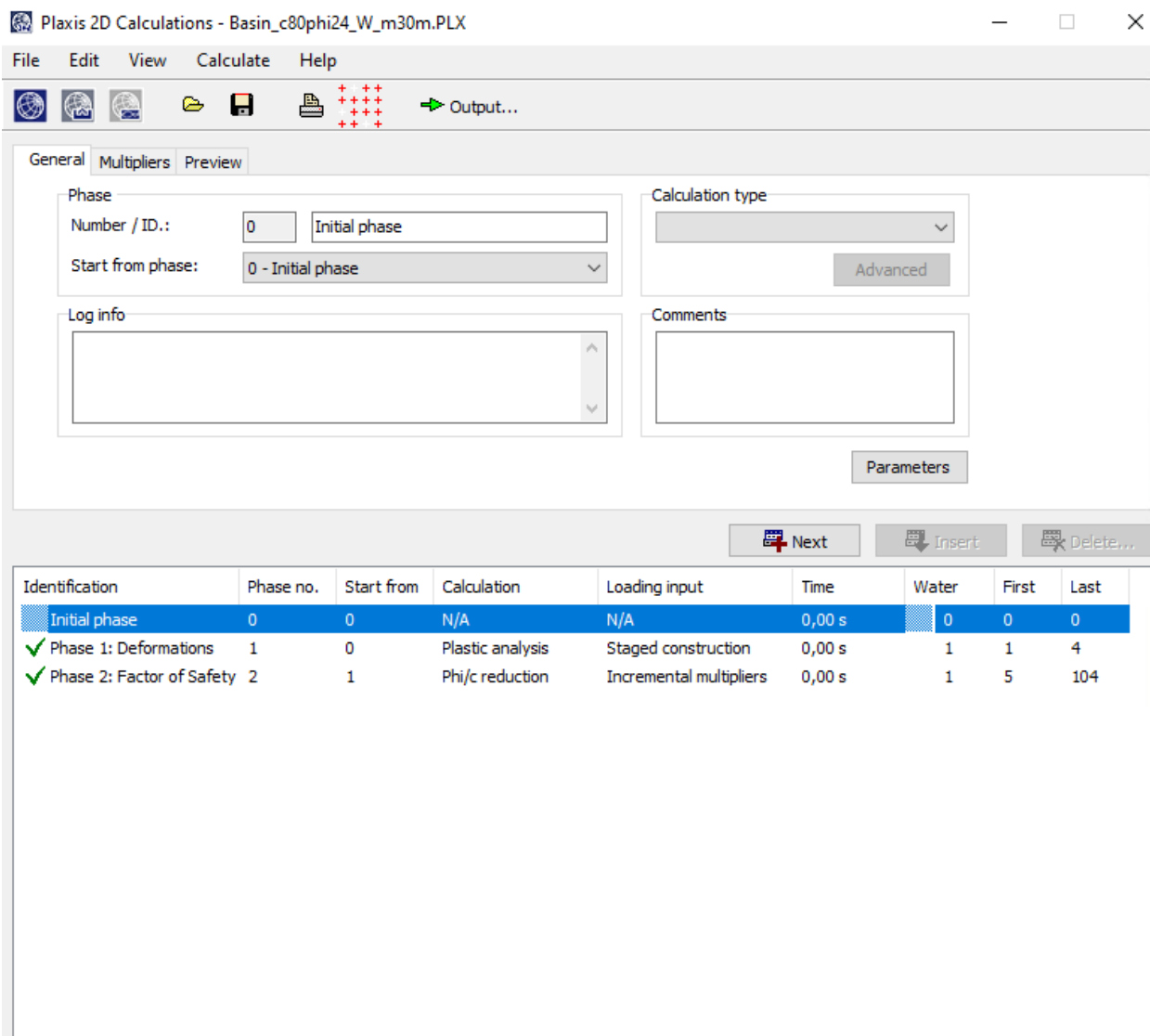
Εικόνα 21. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων σε μεταγενέστερη φάση

Στο δεύτερο στάδιο, αυτό της ανάλυσης, ανήκει το υπο-πρόγραμμα Calculations. Έχοντας ορίσει στο προγενέστερο στάδιο πλήρως τη γεωμετρία του μοντέλου, τις ιδιότητες των σχηματισμών και τις αρχικές συνθήκες, πραγματοποιείται η διαδικασία της ανάλυσης.

Κατά την δημιουργία του προσομοιώματος, ύστερα από την εισαγωγή των ιδιοτήτων των σχηματισμών είναι αναγκαίος ο υπολογισμός των αρχικών τάσεων, καθώς σε αυτή τη φάση δεν έχει υπολογιστεί το βάρος των σχηματισμών. Η διαδικασία όπου επικρατεί για τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων είναι η διαδικασία K_0 (συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων). Παρόλα αυτά, η διαδικασία αυτή ενδείκνυται για προσομοιώματα όπου η στρωματογραφία, η τοπογραφία και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι οριζόντια. Αντίθετα, όταν η γεωμετρία των παραπάνω δεν είναι οριζόντια, κατά τον υπολογισμό των αρχικών τάσεων θα προκύψει σφάλμα. Συνεπώς, για εκσκαφές όπου η γεωμετρία τους δεν είναι οριζόντια προτιμάται η διαδικασία gravity loading. Παρόλα αυτά, η εντολή αυτή είναι δυνατή σε εκδόσεις του προγράμματος Plaxis 2D version 2011 και ύστερα. Στη προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε η δημιουργία ενός μοντέλου όπου προσομοιάζει την περιοχή μελέτης πριν ξεκινήσουν οι εκσκαφές και η εκμετάλλευση του λιγνιτικού κοιτάσματος, εισάγοντας τους σχηματισμούς με σχεδόν οριζόντια κλίση κατά την φάση υπολογισμού των αρχικών τάσεων. Στην συνέχεια, με εκσκαφή και κατ' επέκταση απενεργοποίηση τμημάτων των σχηματισμών αποδίδεται η τελική γεωμετρία της εκσκαφής. Η συγκεκριμένη διαδικασία ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση όλων των αριθμητικών αναλύσεων της παρούσας μελέτης.



Εικόνα 22. Διαμόρφωση της τελικής γεωμετρίας του προσομοιώματος.



Εικόνα 23. Εισαγωγή των κατασκευαστικών φάσεων της προσομοίωσης και του τύπου υπολογισμού.

Οι τέσσερις τύποι προσομοιώσεων όπου προσφέρονται είναι οι εξής:

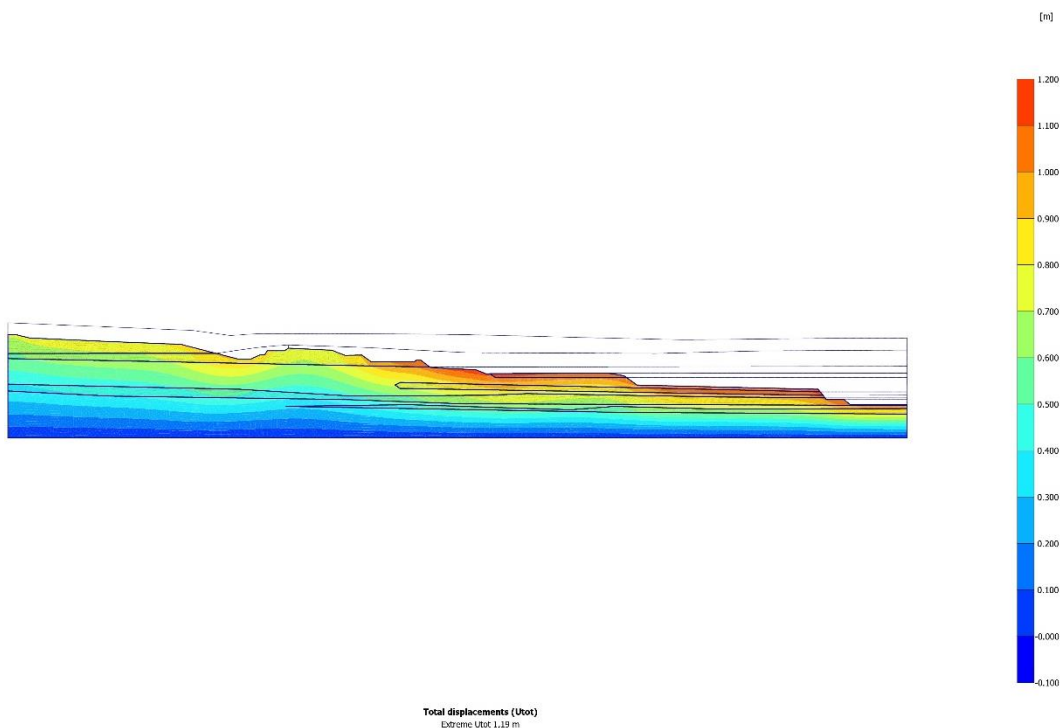
- Plastic,
- Consolidation,
- Phi/C Reduction και
- Dynamic

Στην πρώτη περίπτωση (plastic), κατά την διάρκεια των υπολογισμών το μοντέλο θεωρείται ελαστικό-πλαστικό. Ως αποτέλεσμα αυτού, οι υπερπιέσεις των πόρων δεν λαμβάνονται υπόψιν σε σχέση με τον χρόνο. Αντίθετα, η εφαρμογή πλαστικής συμπεριφοράς προτιμάται κατά την επίλυση πρακτικών γεωτεχνικών ζητημάτων, και προσδίδεται λιγότερη έμφαση στην επίδραση του χρόνου.

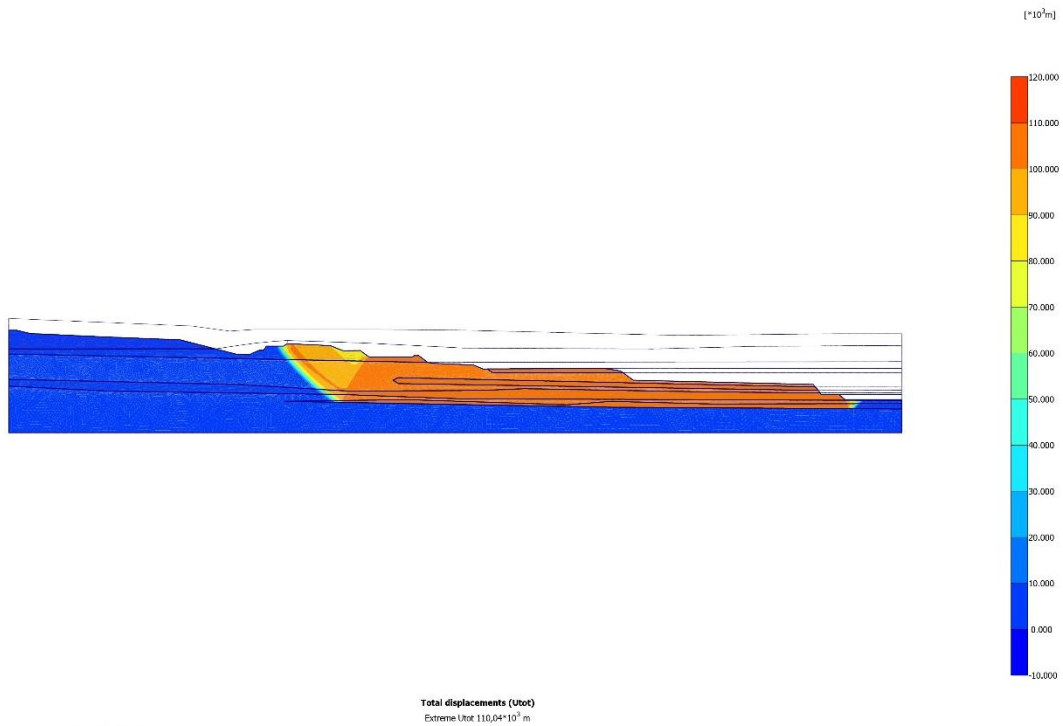
Η δεύτερη περίπτωση, αυτή της στερεοποίησης (Consolidation), εφαρμόζεται κυρίως σε κορεσμένα συμπιεστά εδάφη, όπως τα αργιλικά, και λαμβάνεται υπόψη η εξέλιξη η εκτόνωση ή η υπερπίεση των πόρων σε σχέση με τον χρόνο.

Η τρίτη περίπτωση (Phi/c Reduction) αφορά κυρίως τις αναλύσεις όπου γίνεται χρήση της μεθόδου μείωσης των παραμέτρων αντοχής, όπως η συνοχή c και η γωνία εσωτερικής τριβής ϕ . Κατά αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατός ο υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας του δισδιάστατου μοντέλου, καθώς σταδιακά μειώνονται οι δύο παράμετροι όπου αναφέρθηκαν μέχρι την αστοχία του μοντέλου.

Στο στάδιο της μετα-επεξεργασίας ανήκουν τα δύο υπο-προγράμματα: Plaxis Output και Plaxis Curves. Κατά την χρήση του υπο-προγράμματος Plaxis Output, ο χρήστης έχει την δυνατότητα ελέγχου των αποτελεσμάτων της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης μπορεί να ελέγξει: (α) τις μετακινήσεις (συνολικές, κατακόρυφες, οριζόντιες), (β) τις παραμορφώσεις, (γ) τις τάσεις (ενεργές και συνολικές), (δ) τις πιέσεις των πόρων και (ε) τον συντελεστή ασφαλείας. Ακόμα, είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 24. Απεικόνιση των ολικών μετακινήσεων της εκσκαφής κατά την χρήση του υπο-προγράμματος Plaxis Output.



Εικόνα 25. Απεικόνιση πιθανής επιφάνειας αστοχίας κατά την χρήση του υπο-προγράμματος Plaxis Output.

Αντίστοιχα, με το υπο-πρόγραμμα Plaxis Curves, είναι δυνατή η εξαγωγή διαγραμμάτων, και ο χρήστης έχει την δυνατότητα να ελέγξει τα αποτελέσματα και τις παραμέτρους σε συνάρτηση με τον χρόνο.

4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση όπου επικεντρώνεται σε τρεις καίριες παραμέτρους, σχετιζόμενες με την ευστάθεια των πρानών εντός του ορυχείου. Η παραμετρική ανάλυση εμβαθύνει στην επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών του προσομοιώματος, όπως η συνοχή, η εσωτερική γωνία τριβής και το μέτρο ελαστικότητας, στην επίδραση της διακύμανσης στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και την επίδραση της γεωμετρίας του ανοικτής εκσκαφής.

Στο πεδίο Χωρεμίου του λιγνιτικού κέντρου Μεγαλόπολης όπου επικεντρώθηκε η συγκεκριμένη εργασία εντοπίζονται δύο βασικές ζώνες εκμεταλλεύσιμου λιγνίτη. Η ανώτερη ζώνη λιγνίτη εντοπίζεται υψομετρικά μεταξύ +330 m και +360 m από την στάθμη της θάλασσας, και χαρακτηρίζεται από ενδιάμεσες στρώσεις άγονων. Αντίθετα, η κατώτερη ζώνη λιγνίτη εντοπίζεται υψομετρικά μεταξύ +285 m και +315 m από την στάθμη της θάλασσας, και εντός της ζώνης επίσης εντοπίζονται στρώματα αργίλου και μαργών. Παράλληλα, οι στρώσεις του λιγνίτη έχουν αποθεθεί με κλίση 3% έως 8% από Ανατολή προς Δύση. Συνεπώς, η κλίση των στρωμάτων θεωρείται δυσμενής, καθώς η προχώρηση της εκμετάλλευσης στην λιγνιτοφόρο λεκάνη πραγματοποιείται προς τα δυτικά κράσπεδα αυτής.

Αναφορικά με τους σχηματισμούς όπου συμπεριλήφθηκαν στις αριθμητικές αναλύσεις, οι σχηματισμοί κατά σειρά βάθους όπου εντοπίζονται είναι:

- οι Τεταρτογενείς αποθέσεις με υψηλά ποσοστά ερυθρής αργίλου,
- οι λιγνιτικές στιβάδες, και
- στρώματα αργίλου.

Αρχικά, κατά την διεξαγωγή των αριθμητικών αναλύσεων λήφθηκε υπόψιν ότι τα στρώματα αργίλου ανάμεσα στις λιγνιτικές στιβάδες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της ανοικτής εκσκαφής. Παράλληλα, για λόγους απλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας λήφθηκε η παραδοχή ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου είναι παρόμοια κατά μήκος όλης της διατομής όπου εξετάστηκε.

Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στην ολοκληρωμένη αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ευστάθεια των πρानών και της ανοικτής εκσκαφής. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών όπου συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο των αριθμητικών αναλύσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6:

Πίνακας 6. Μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών του προσομοιώματος.

Στρωματογραφία	Καταστατικό Προσομοίωμα	Φαινόμενο Βάρος		Υδροπερατότητα		Λόγος Poisson	Μέτρο Ελαστικότητας	Συνοχή	Γωνία Εσωτερικής Τριβής	Γωνία Διαστολικότητας
		γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	k_x (m/s)	k_y (m/s)	ν	E_{ref} (kN/m ²)	c_{ref} (kN/m ²)	ϕ (°)	ψ (°)
Τεταρτογενή-Ερυθρή Άργιλος	Mohr-Coulomb	18	19	2.00E-04	2.00E-04	0.3	30000-50000	30-50	25-35	0
Λιγνιτική Στιβάδα	Mohr-Coulomb	12	13	2.00E-08	2.00E-08	0.3	60000	90	27.5	0
Στρώματα Άργιλου	Mohr-Coulomb	16	17	2.00E-04	2.00E-04	0.3	30000-50000	70-100	20-28	0

Οι παραμετρικές αναλύσεις όπου διεξήχθησαν στη παρούσα εργασία διεξήχθησαν με χρήση του προγράμματος PLAXIS 2D, του οποίου τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες αναλύθηκαν εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3^ο). Οι αριθμητικές αναλύσεις βασίστηκαν στα μηχανικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 6, και σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά αυτά πραγματοποιήθηκαν οι αριθμητικές αναλύσεις.

Οι σειρές παραμετρικών αναλύσεων όπου πραγματοποιήθηκαν είναι οι εξής:

1^η Σειρά Αναλύσεων: Εξέταση της μεταβολής των μηχανικών χαρακτηριστικών των στρωμάτων αργίλου ενδιάμεσα στις λιγνιτικές στρώσεις και των Τεταρτογενών αποθέσεων ερυθρής αργίλου, απουσία υδροφόρου ορίζοντα.

2^η Σειρά Αναλύσεων: Εξέταση της προσθήκης υδροφόρου ορίζοντα, ο οποίος εντοπίζεται στα -6m κάτω από την κοίτη του Αλφειού ποταμού, και η στάθμη του ακολουθεί ομαλή κλίση μέχρι τον πόδα του πρανούς στη θέση: X: +1050 m του προσομοιώματος. Παράλληλα, ομοίως με την 1^η σειρά αναλύσεων μεταβάλλονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου ενδιάμεσα στις λιγνιτικές στρώσεις και των Τεταρτογενών αποθέσεων ερυθρής αργίλου.

3^η Σειρά Αναλύσεων: Εξέταση της επίδρασης της σταδιακής ταπείνωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, και μείωσης του έως την επαφή περατού-αδιαπέρατου σε βάθος -30m από την αρχική στάθμη για μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικών στρωμάτων $c=80$ kPa και $\varphi=24^\circ$, και $c=43$ kPa και $\varphi=30^\circ$ αντίστοιχα για το στρώμα ερυθρής αργίλου. Η σειρά αυτή αποσκοπεί στην αξιολόγηση της επιρροής του υδροφόρου ορίζοντα στην ευστάθεια των πρανών υπό ποικίλες πιεζομετρικές στάθμες.

4^η Σειρά Αναλύσεων: Εξετάζει τη μεταβολή της γεωμετρίας της ανοικτής εκσκαφής, κατά την οποία αφαιρείται τμήμα της ανώτερης λιγνιτικής στιβάδας, και διαμορφώνεται ηπιότερη κλίση για την μείωση των ολικών και οριζόντιων μετακινήσεων.

Κάθε σειρά αναλύσεων σχεδιάστηκε να βασίζεται μερικώς στα ευρήματα των προηγούμενων σειρών, εξετάζοντας σταδιακά την αλληλεπίδραση των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών με την γεωμετρία της εκσκαφής και την διαχείριση των υπογείων υδάτων. Τέλος, η 3η και 4η σειρά αναλύσεων στοχεύουν στην εξέταση πρακτικών στρατηγικών για τον μετριασμό των ζητημάτων ευστάθειας των πρανών της ανοικτής εκσκαφής. Όλες οι παραπάνω αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε προσομοιώματα δισδιάστατης επίπεδης παραμόρφωσης (Plane Strain Model), και το πλέγμα όπου χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις ήταν το πυκνότερο (Very Fine Mesh).

4.2 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.2.1 1^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΡΓΙΛΟΥ ΚΑΙ ΕΡΥΘΡΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ

Αυτή η σειρά παραμετρικών αναλύσεων αποσκοπεί στην εκτίμηση της επίδρασης των μεταβολών των μηχανικών ιδιοτήτων των στρώσεων αργίλου και των Τεταρτογενών αποθέσεων στην ευστάθεια της ευρύτερης εκσκαφής του πεδίου. Κύριος στόχος είναι η κατανόηση της επίδρασης της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων, δηλαδή της συνοχής, της γωνίας εσωτερικής τριβής και του μέτρου ελαστικότητας στις παρατηρούμενες μετακινήσεις και στον συντελεστή ασφαλείας, υπό στραγγιζόμενες συνθήκες.

Όπως προαναφέρθηκε, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου αποτελούν βασικό παράγοντα στην καταγραφή υψηλών μετακινήσεων. Ακόμα, σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια της εκσκαφής πλησίον του τεχνητού αναχώματος του Αλφειού διαδραματίζει η παρουσία τεταρτογενών αποθέσεων, όπου ο κυριότερος σχηματισμός είναι αυτός της ερυθρής αργίλου. Συνεπώς, η πρώτη αριθμητικών αναλύσεων όπου διεξάχθηκε, επικεντρώθηκε στην μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών των δύο αυτών σχηματισμών.

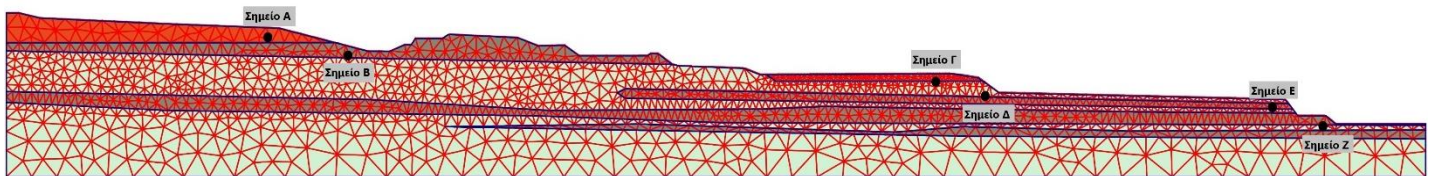
Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις για την εύρεση του βαθμού επιρροής των μηχανικών ιδιοτήτων στην ευστάθεια του πρηνούς, για συνδυασμούς των τιμών συνοχής, γωνίας τριβής και μέτρου ελαστικότητας των δύο σχηματισμών. Συνεπώς, για τα στρώματα αργίλου εκτελέστηκαν αναλύσεις με τους συνδυασμούς των μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών να παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7:

Πίνακας 7. Συνοπτική παρουσίαση των συνδυασμών των μηχανικών ιδιοτήτων των δύο σχηματισμών όπου εξετάστηκαν.

	A/A	Συνοχή (kPa)	Γωνία Εσωτ. Τριβής φ (°)	Μέτρο Ελαστικότητας E (kPa)
Στρώσεις Αργίλου	1	100	20	40.000
	2	80	24	30.000
	3	70	28	50.000
Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου	1	50	25	40.000
	2	43	30	30.000
	3	30	35	50.000

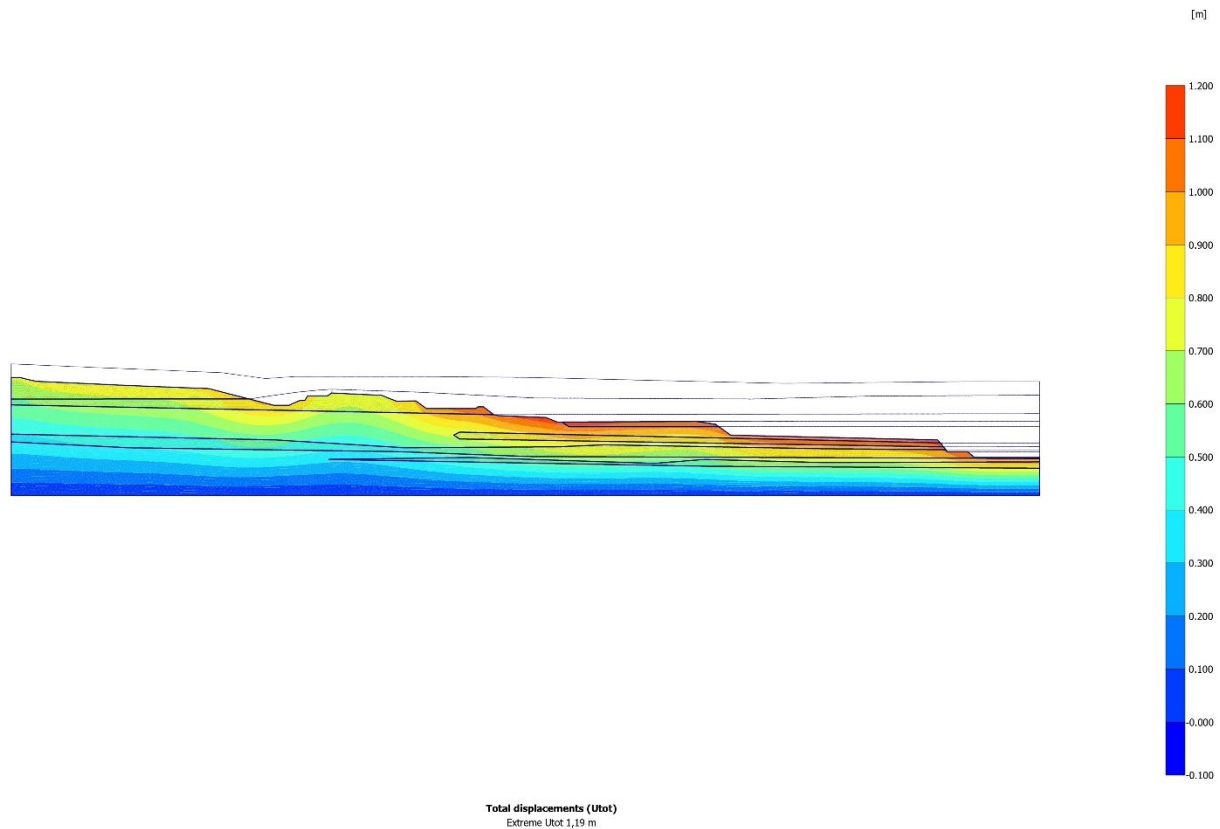
Η εξέταση των παραπάνω συνδυασμών των τιμών των μηχανικών χαρακτηριστικών πραγματοποιήθηκε για την εκτίμηση της επίδραση τους συνολικά στην ευστάθεια της ευρύτερης εκσκαφής. Γενικότερα, οι τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών όπου επικρατούν στην υπό εξέταση περιοχή για τα στρώματα αργίλου ενδιάμεσα στις λιγνιτικές στιβάδες είναι συνοχή $c=80$ kPa, γωνία εσωτερικής τριβής 24° και μέτρο ελαστικότητας 30000 kPa. Αντίστοιχα, για τις Τεταρτογενείς αποθέσεις ερυθρής αργίλου είναι συνοχή $c=43$ kPa, γωνία εσωτερικής τριβής 30° και μέτρο ελαστικότητας 30000 kPa.

Για την βέλτιστη εξέταση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα ορισμένα σημεία ελέγχου. Αρχικά, επιλέχθηκαν τα σημεία Α και Β, τα οποία βρίσκονται εντός των τεταρτογενών αποθέσεων και εντός της ανώτερης λιγνιτικής στρώσης αντίστοιχα. Τα δύο αυτά σημεία εντοπίζονται σε πρανές με ιδιαίτερα χαμηλή κλίση πρανούς. Στην συνέχεια, τα σημεία Γ και Δ ορίστηκαν σε πρανές με μεγαλύτερη κλίση, και τέλος τα σημεία Ε και Ζ επιλέχθηκαν σε πρανές, όπου η κλίση του είναι 24° και η εκμετάλλευση βρίσκεται σε πιο προχωρημένο στάδιο. Οι θέσεις των σημείων όπου αναφέρθηκαν διακρίνονται καλύτερα στην Εικόνα 26.



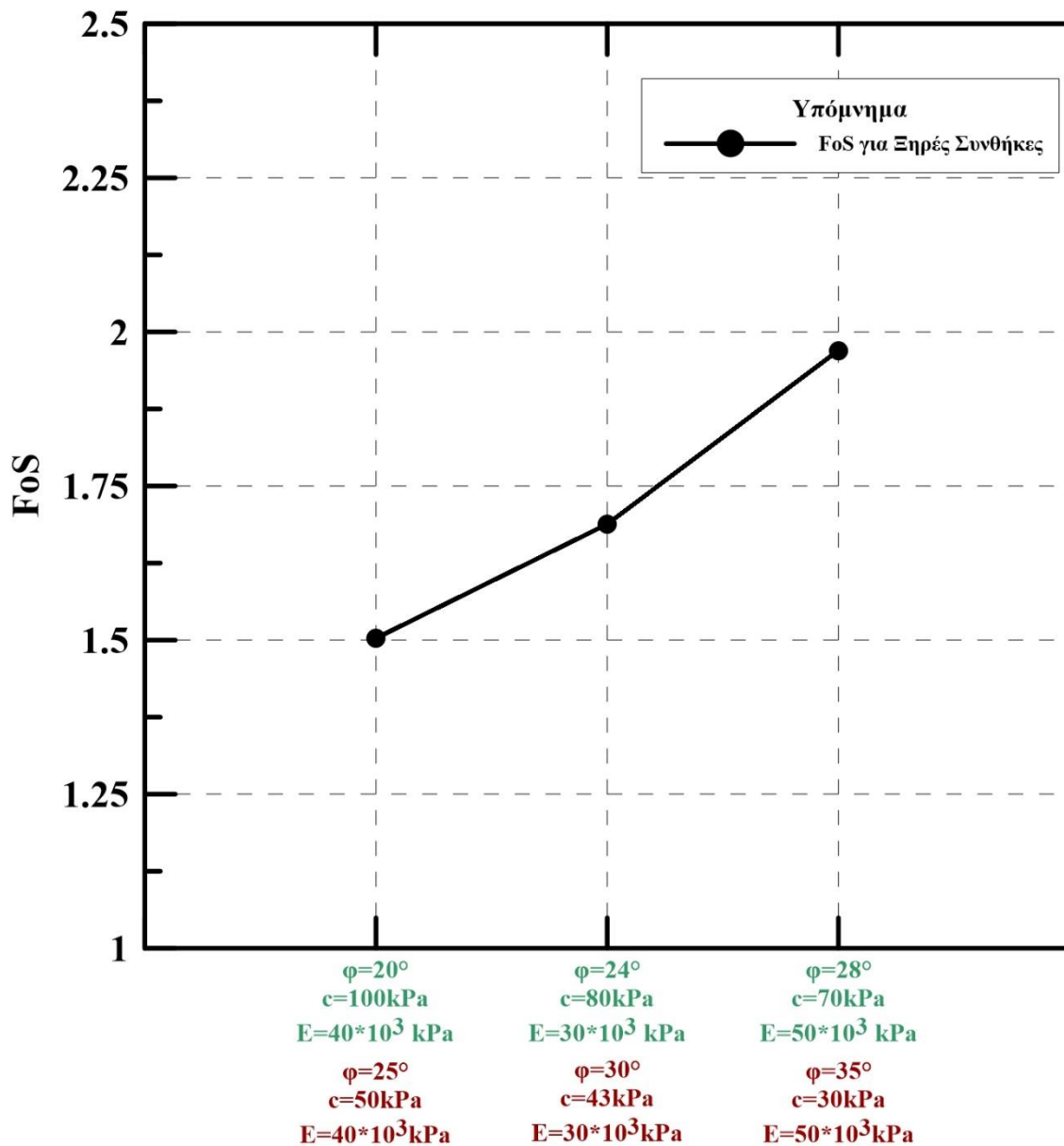
Εικόνα 26. Απεικόνιση του προσομοιώματος με τα σημεία ελέγχου όπου επιλέχθηκαν για τον έλεγχο των μετακινήσεων και του συντελεστή ασφαλείας.

Στην Εικόνα 27 παρουσιάζεται το γράφημα με τις απόλυτες μετακινήσεις, απουσία υδροφόρου ορίζοντα για μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa. Στο γράφημα παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εντοπίζονται στην περιοχή όπου βρίσκονται τα σημεία Ε και Ζ. Το τμήμα της εκσκαφής στην περιοχή εκείνη υφίσταται υψηλότερες μετακινήσεις, καθώς το πρανές έχει μεγαλύτερη κλίση συγκριτικά με τα υπόλοιπα πρανή.



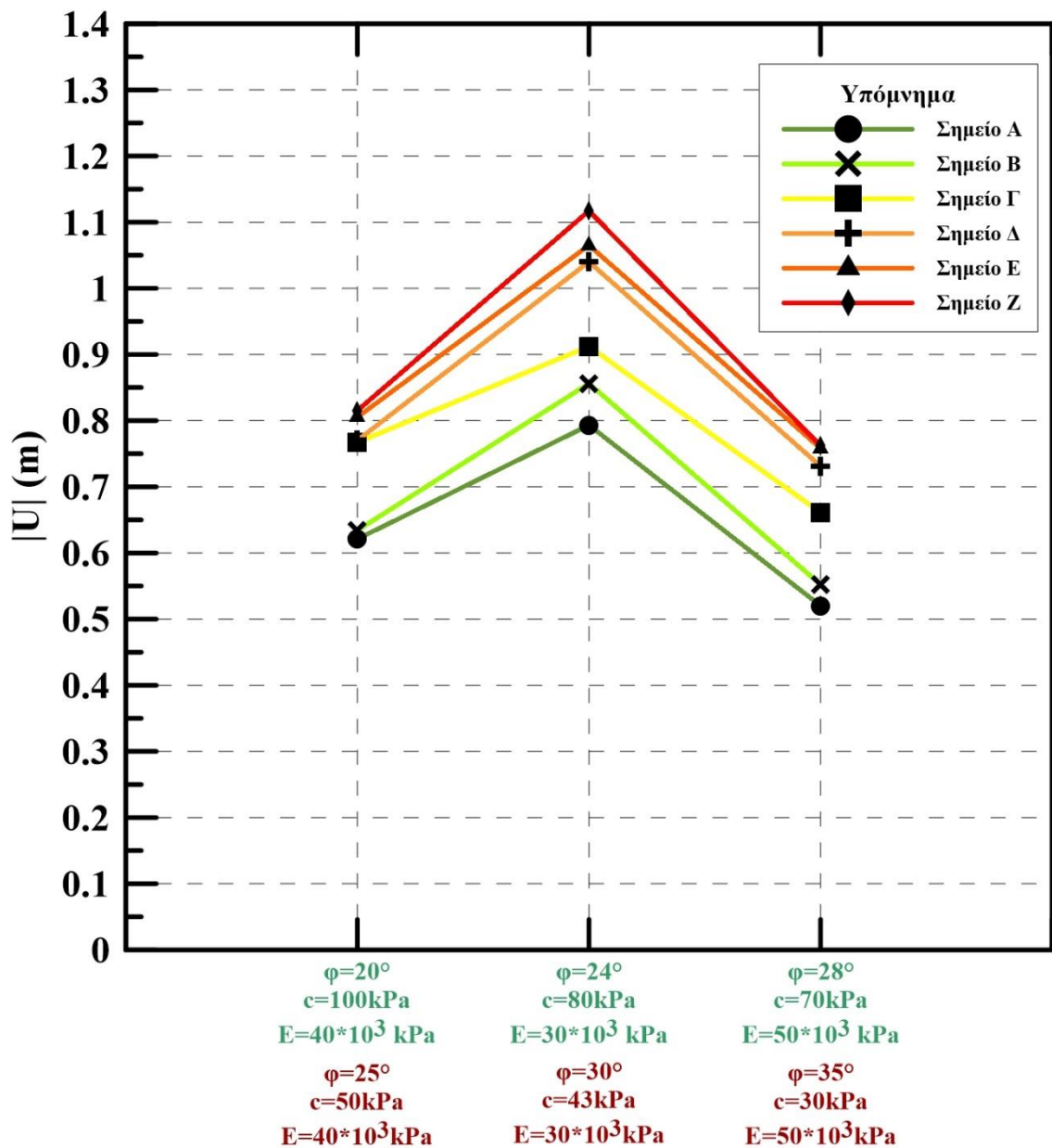
Εικόνα 27. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Στην Εικόνα 28 γίνεται σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας όπου προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις όπου εκτελέστηκαν. Παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις όπου το μέτρο ελαστικότητας E και η εσωτερική γωνία τριβής αυξάνονται, ο συντελεστής ασφαλείας είναι υψηλότερος. Αυτό υποδηλώνει ότι ακόμα και με χαμηλότερες τιμές συνοχής για τους δύο σχηματισμούς, η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και της γωνίας εσωτερικής τριβής συμβάλλουν θετικά στην τιμή του συντελεστή ευστάθειας.



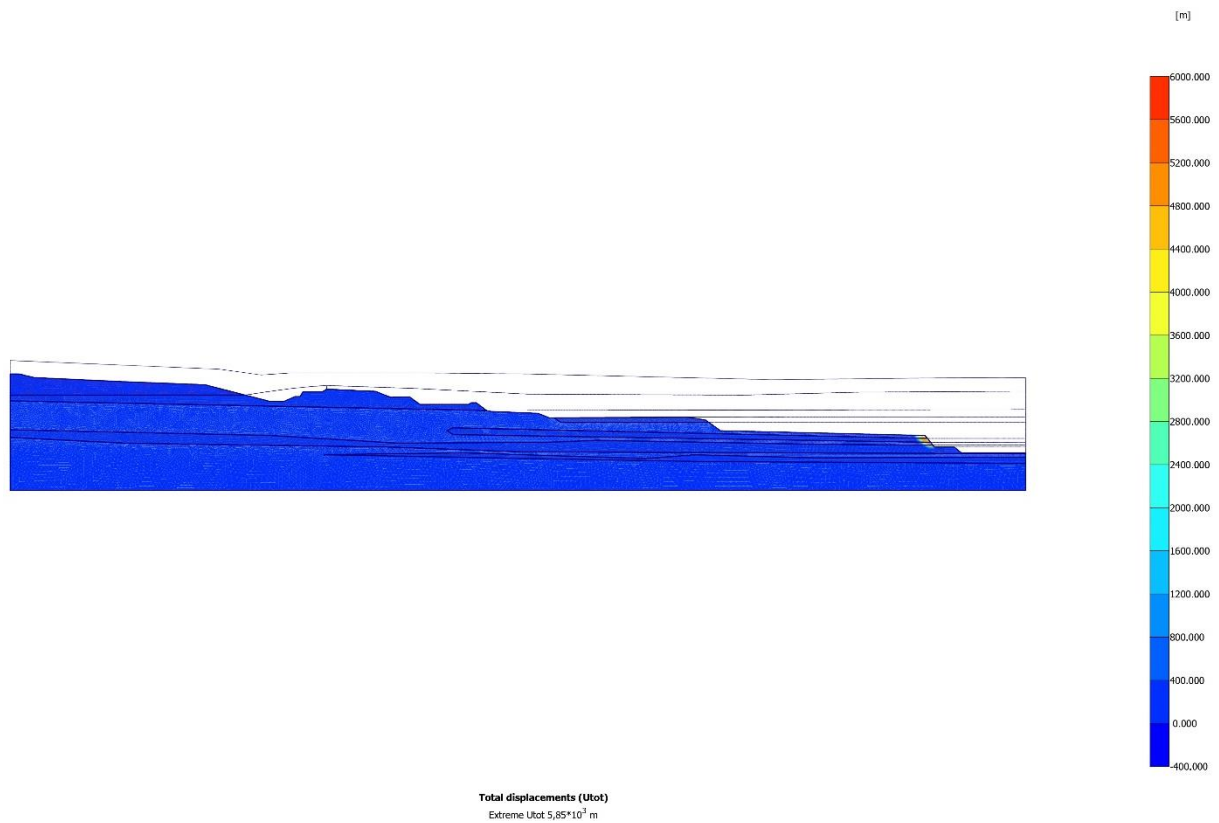
Εικόνα 28. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας, απουσία υδροφόρου οριζοντα, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου.

Παρόλα αυτά, σύμφωνα με την Εικόνα 29 όπου παρουσιάζονται οι παρατηρούμενες μετακινήσεις συναρτήσει των μηχανικών χαρακτηριστικών, παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας επιδρά περισσότερο στις παρατηρούμενες απόλυτες μετακινήσεις. Συνεπώς, συγκρίνοντας τα προσομοιώματα παρατηρείται ότι με ενδιάμεσες τιμές συνοχής και εσωτερικής γωνίας τριβής, όπως στην περίπτωση όπου οι αργλικές στρώσεις έχουν $c=80\text{ kPa}$ και $\phi=24^\circ$ και την χαμηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, οι μετακινήσεις είναι οι υψηλότερες σε σχέση με τους άλλους δύο συνδυασμούς. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου η συνοχή έχει τη χαμηλότερη τιμή, ενώ η εσωτερική γωνία τριβής και το μέτρο ελαστικότητας αυξάνονται οι απόλυτες μετακινήσεις μειώνονται σημαντικά.



Εικόνα 29. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου για τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.

Τέλος, στην Εικόνα 30 παρουσιάζονται οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα. Η περιοχή όπου δύναται να αστοχήσει είναι κλίμακας βαθμίδας, και ο κύκλος αστοχίας του υπό εξέταση πρανούς είναι μικρός. Γενικότερα, σε αυτή την σειρά αναλύσεων, όπου δεν αναπτύχθηκαν πιέσεις πόρων εντός των σχηματισμών δεν τέθηκαν ζητήματα ευστάθειας. Συγχρόνως, οι συντελεστές ασφαλείας για τα τρία σενάρια μηχανικών ιδιοτήτων όπου εξετάστηκαν κυμαίνονταν μεταξύ 1,5 και 2, υποδηλώνοντας ένα αποδεκτό επίπεδο ευστάθειας.



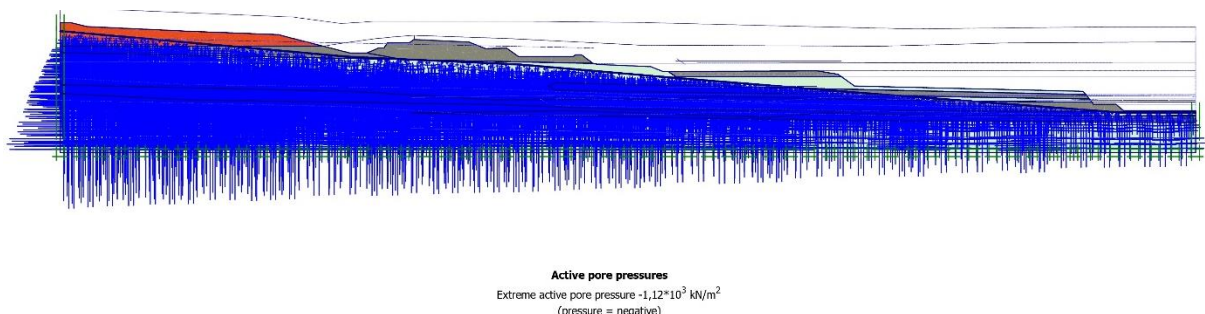
Εικόνα 30. Δυναμικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

4.2.2 2^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΑΡΓΙΛΟΥ ΚΑΙ ΕΡΥΘΡΗΣ ΑΡΓΙΛΟΥ, ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Αυτή η σειρά παραμετρικών αναλύσεων αξιολογεί τις επιπτώσεις της εισαγωγής υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, ο οποίος εντοπίζεται στα -6m κάτω από την κοίτη του Αλφειού ποταμού, και η στάθμη του ακολουθεί ομαλή κλίση μέχρι τον πόδα του πρανούς στη θέση: X: +1050 m του προσομοιώματος. Ομοίως με την 1^η σειρά αναλύσεων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου ενδιάμεσα στις λιγνιτικές στρώσεις και των Τεταρτογενών αποθέσεων ερυθρής αργίλου μεταβάλλονται.

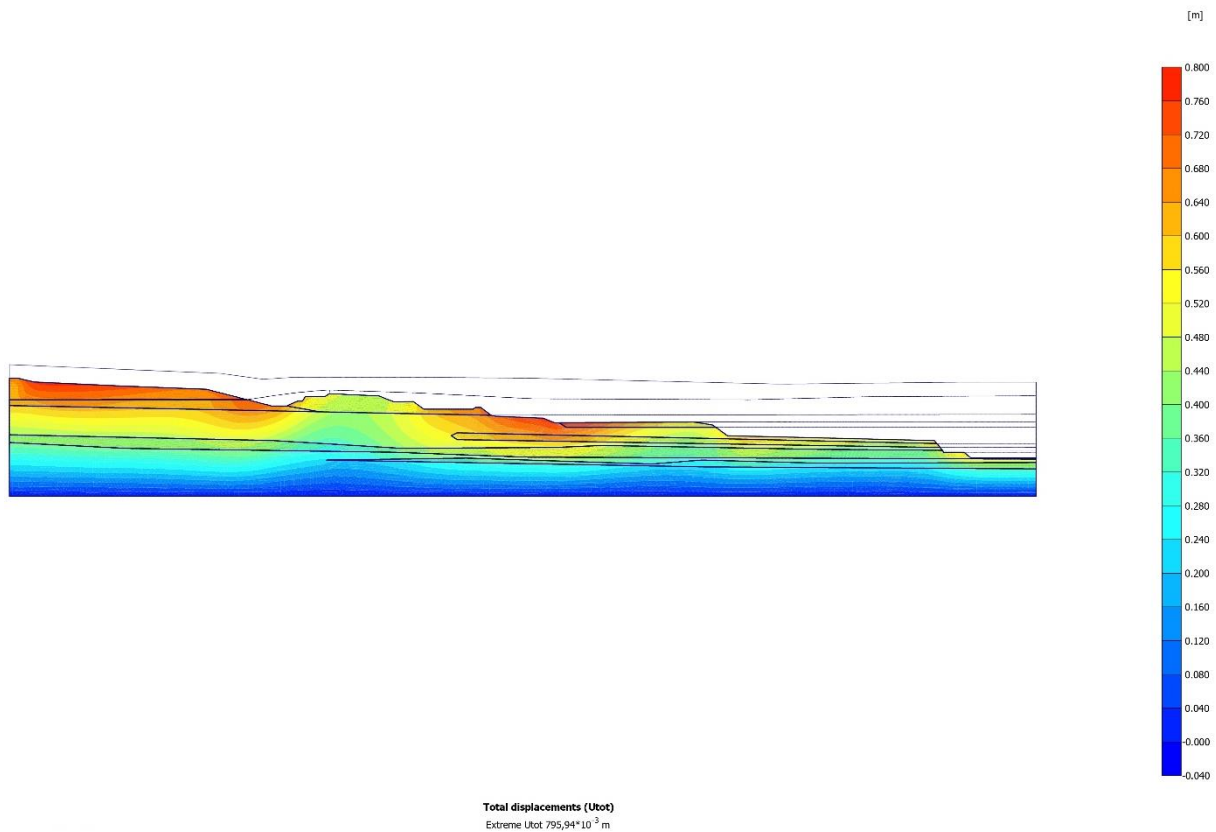
Η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των υπόγειων υδάτων και των σχηματισμών προσομοιώνεται για την εκτίμηση των αλλαγών στην πίεση των πόρων και κατ' επέκταση στην ευστάθεια του πρανούς (Εικόνα 31). Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι ζωτικής σημασίας για στρατηγικό σχεδιασμό και την λήψη αποτελεσματικών αποφάσεων, όπως η πραγματοποίηση αποστραγγιστικών γεωτρήσεων για την διαχείριση ζητημάτων ευστάθειας. Οι συνδυασμοί των μηχανικών ιδιοτήτων των σχηματισμών παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 7. Πίνακας 7.

Για την βέλτιστη εξέταση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα ορισμένα σημεία ελέγχου. Αυτό αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση της κατανομής των μετακινήσεων και της μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας κατά μήκος της ανοικτής εκσκαφής. Τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος όπου επιλέχθηκαν είναι τα ίδια με την πρώτη σειρά παραμετρικών αναλύσεων για άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.



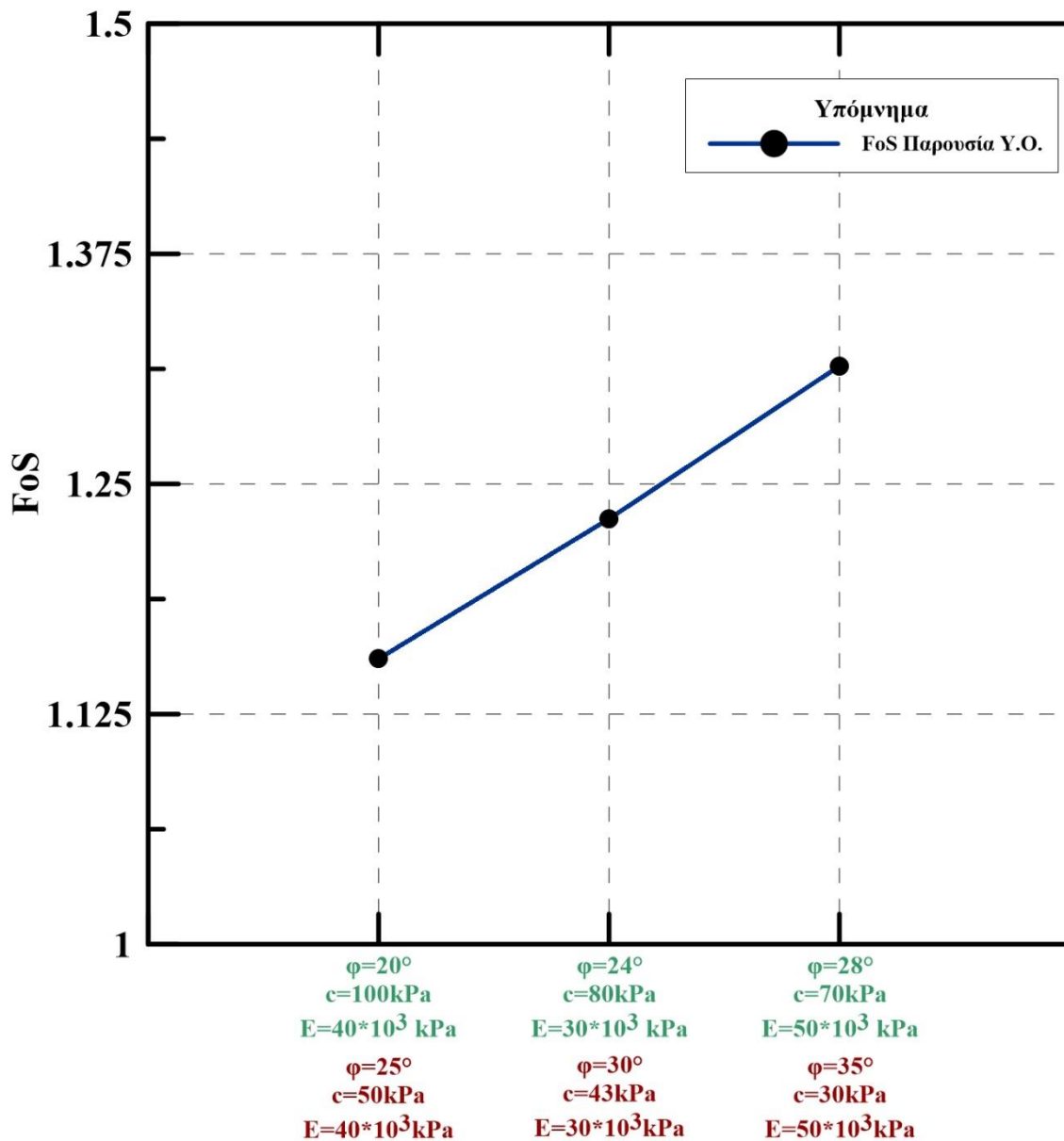
Εικόνα 31. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με εισαγωγή του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα.

Στην Εικόνα 32 παρουσιάζεται το γράφημα με τις απόλυτες μετακινήσεις για μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa. Στην συγκεκριμένη σειρά αναλύσεων παρατηρήθηκαν υψηλές μετακινήσεις και στην περιοχή όπου έχουν αποτεθεί οι Τεταρτογενείς αποθέσεις ερυθρής αργίλου, παρά το γεγονός ότι η κλίση του πρανούς είναι ηπιότερη. Οι επάλληλες επιφάνειες αστοχίας στο ανώτερο τμήμα του πρανούς και σε χαμηλότερες βαθμίδες υποδεικνύουν μία σταδιακή αστοχία του πρανούς συνολικά.



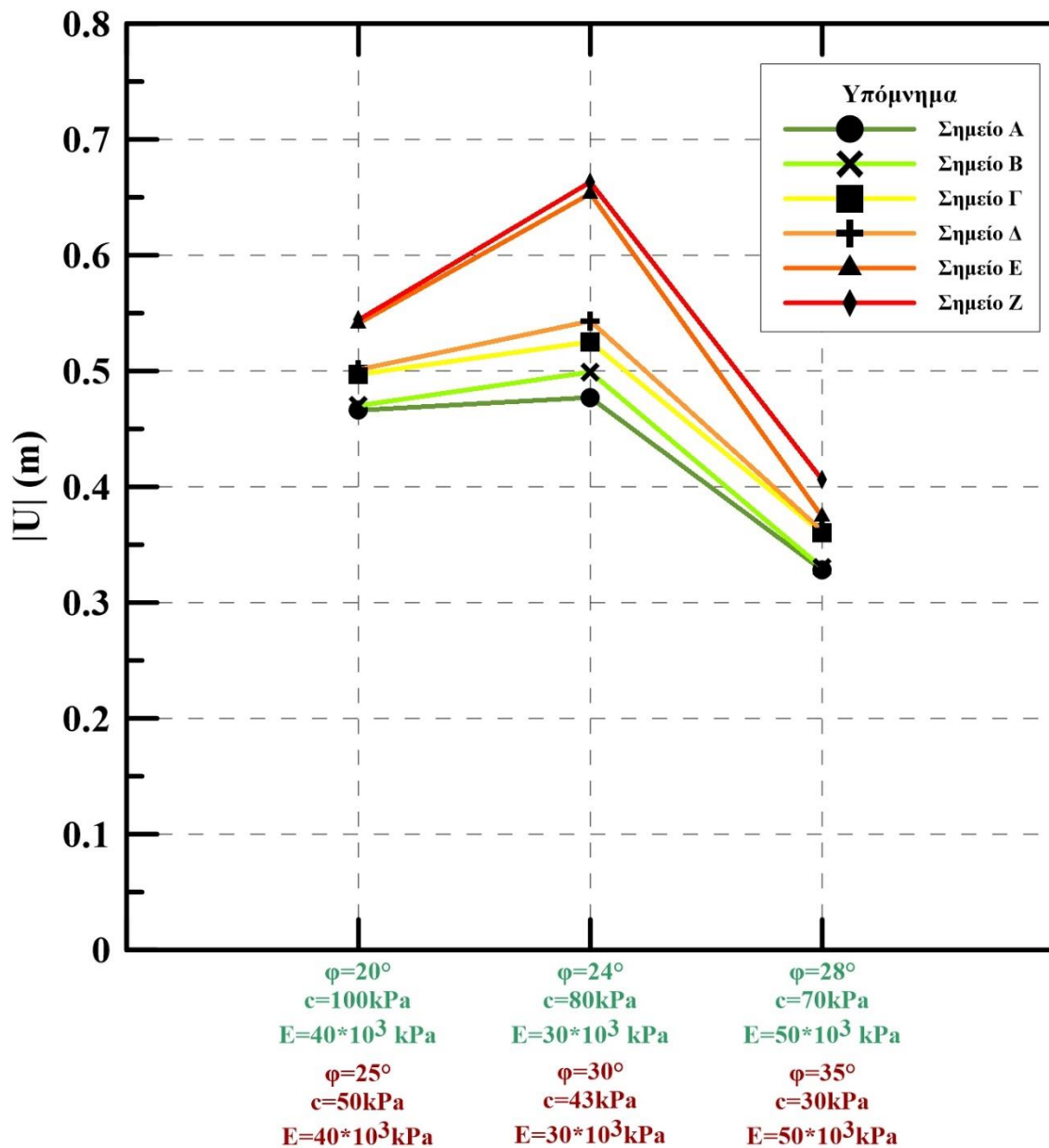
Εικόνα 32. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Στην Εικόνα 33 παρουσιάζεται μια σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας όπου προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις όπου εκτελέστηκαν. Όπως στην 1^η σειρά αναλύσεων, αντίστοιχα παρατηρείται ότι στις περιπτώσεις όπου το μέτρο ελαστικότητας E και η εσωτερική γωνία τριβής αυξάνονται, ο συντελεστής ασφαλείας είναι υψηλότερος. Ωστόσο είναι αξιοσημείωτο ότι οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας είναι εμφανώς απομειωμένες και κυμαίνονται μεταξύ 1,1 και 1,35, υποδηλώνοντας οριακές συνθήκες ευστάθειας.



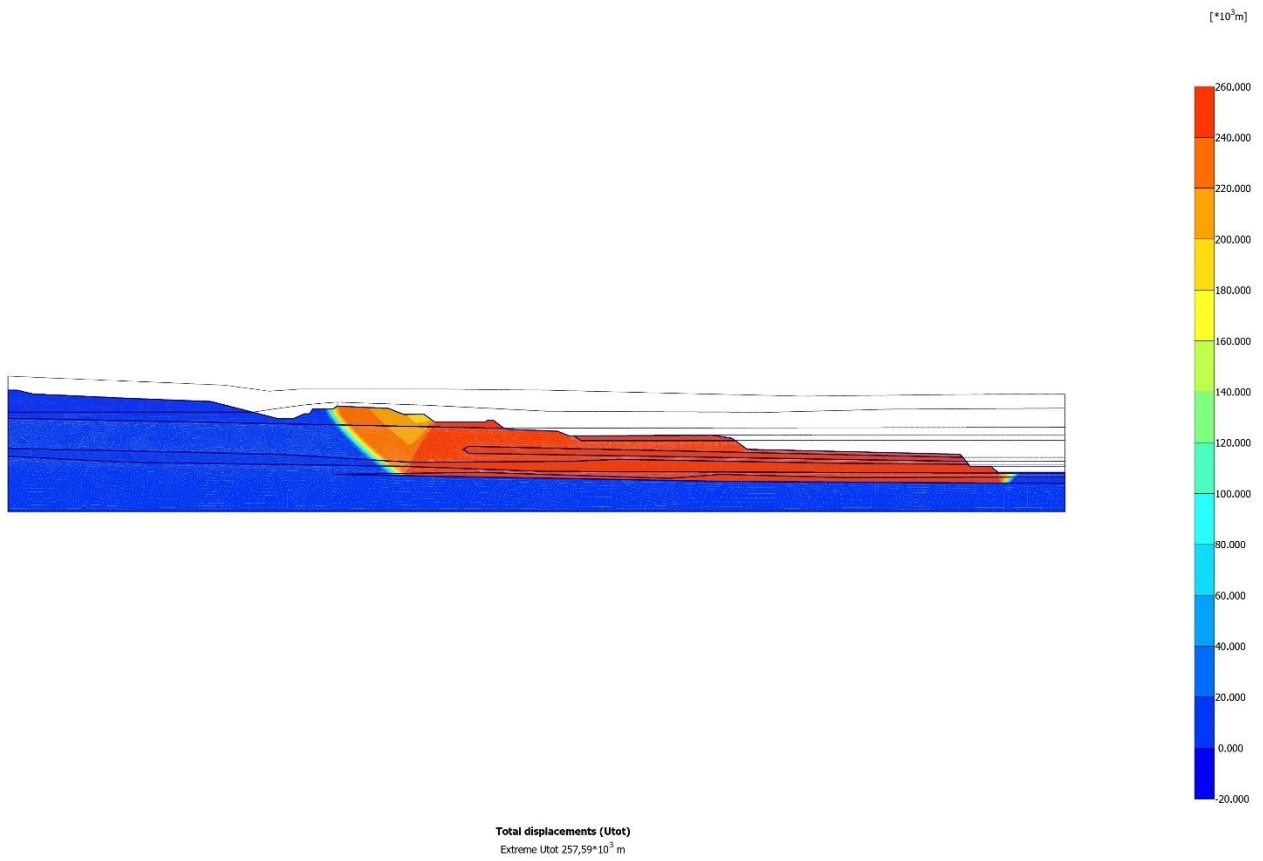
Εικόνα 33. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας, ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου.

Σύμφωνα με την Εικόνα 34 παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας επιδρά περισσότερο στις παρατηρούμενες απόλυτες μετακινήσεις. Συνεπώς, συγκρίνοντας τα προσομοιώματα παρατηρείται ότι με ενδιάμεσες τιμές συνοχής και εσωτερικής γωνίας τριβής, όπως στην περίπτωση όπου οι αργιλικές στρώσεις έχουν $c=80 \text{ kPa}$ και $\phi=24^\circ$ και την χαμηλότερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας, οι μετακινήσεις είναι οι υψηλότερες σε σχέση με τους άλλους δύο συνδυασμούς. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου η συνοχή έχει τη χαμηλότερη τιμή, ενώ η εσωτερική γωνία τριβής και το μέτρο ελαστικότητας αυξάνονται οι απόλυτες μετακινήσεις μειώνονται σημαντικά.



Εικόνα 34. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, παρουσία υδροφόρου ορίζοντα (-6m), ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των στρωμάτων αργίλου και των αποθέσεων ερυθρής αργίλου για τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.

Στην Εικόνα 35 παρουσιάζονται οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της εκσκαφής. Γίνεται αντιληπτό ότι το μέγεθος της αστοχίας και το βάθος της επιφάνειας της δυνητικής αστοχίας είναι ιδιαίτερα μεγάλο, και σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της προηγούμενης σειράς αναλύσεων η εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα στην προσομοίωση, με υψηλή πιεζομετρική στάθμη αυξάνει σημαντικά τις υδροστατικές τάσεις. Παράλληλα, η έκταση της δυνητικής επιφάνειας αστοχίας μπορεί να θέσει σε κίνδυνο την λειτουργία του ορυχείου και του προσωπικού.



Εικόνα 35. Δυναμικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

4.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ 1^{ΗΣ} ΚΑΙ 2^{ΗΣ} ΣΕΙΡΑΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο πρώτων σειρών αναλύσεων υποδεικνύει διακριτές διαφορές στην ευστάθεια της εκσκαφής λόγω των διαφορετικών γεωτεχνικών συνθηκών όπου επικρατούν. Στην 1^η σειρά αναλύσεων όπου στο μοντέλο δεν είχε γίνει εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας κυμαίνονταν μεταξύ 1,5 και 2.

Αντίθετα, στην 2^η σειρά αναλύσεων η εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζει σημαντική μείωση του συντελεστή ασφαλείας σε βαθμό όπου επικρατούσαν οριακές συνθήκες ευστάθειας και αυτό υπογραμμίζει την επιτακτική ανάγκη λήψης αποφάσεων για τον μετριασμό των ζητημάτων ευστάθειας.

Συγκεντρωτικά, οι συντελεστές ασφαλείας (FoS) όπου προέκυψαν από τις δύο πρώτες σειρές αριθμητικών αναλύσεων όπου εκπονήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 8:

Πίνακας 8. Συγκεντρωτικός πίνακας με τους συντελεστές ασφαλείας (FoS) όπου προέκυψαν από την πρώτη και δεύτερη σειρά αριθμητικών αναλύσεων.

Απουσία Υδροφόρου Ορίζοντα	FoS
Μηχανικές Παράμετροι	
1. Στρώσεις Αργίλου c=100 kPa, φ=20°, E=40.000 kPa- Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου c=50 kPa, φ=25°, E=40.000 kPa	1,503
2. Στρώσεις Αργίλου c=80 kPa, φ=24°, E=30.000 kPa- Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου c=43 kPa, φ=30°, E=30.000 kPa	1,688
3. Στρώσεις Αργίλου c=70 kPa, φ=28°, E=50.000 kPa- Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου c=30 kPa, φ=35°, E=50.000 kPa	1,97
Προσθήκη Υδροφόρου Ορίζοντα (-6m)	
Μηχανικές Παράμετροι	
1. Στρώσεις Αργίλου c=100 kPa, φ=20°, E=40.000 kPa- Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου c=50 kPa, φ=25°, E=40.000 kPa	1,155
2. Στρώσεις Αργίλου c=80 kPa, φ=24°, E=30.000 kPa- Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου c=43 kPa, φ=30°, E=30.000 kPa	1,231
3. Στρώσεις Αργίλου c=70 kPa, φ=28°, E=50.000 kPa- Τεταρτογενείς Αποθέσεις Ερυθρής Αργίλου c=30 kPa, φ=35°, E=50.000 kPa	1,314

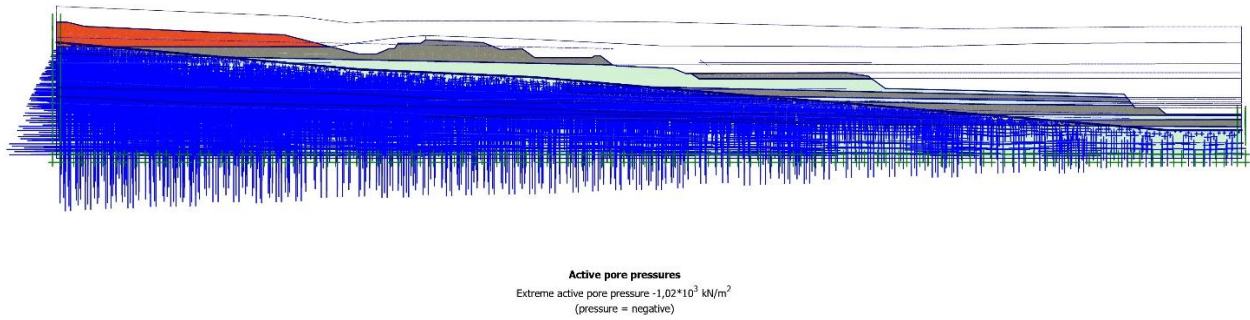
4.2.4 3^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΑΙ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ

Σε αυτή τη σειρά παραμετρικών αναλύσεων γίνεται εμβάθυνση στην επίδραση της μείωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Στη 2^η σειρά αναλύσεων, η στάθμη του υδροφόρου εντοπιζόταν σε βάθος 6m κάτω από την κοίτη του Αλφειού ποταμού, και η στάθμη του ακολουθεί ομαλή κλίση μέχρι τον πόδα του πρανούς στη θέση: X: +1050 m του προσομοιώματος. Συνεπώς, οι υδροστατικές πιέσεις ήταν ιδιαίτερα υψηλές. Στην περίπτωση αυτή θα πραγματοποιηθεί ελεγχόμενη μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 10m, 20m και 30m για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

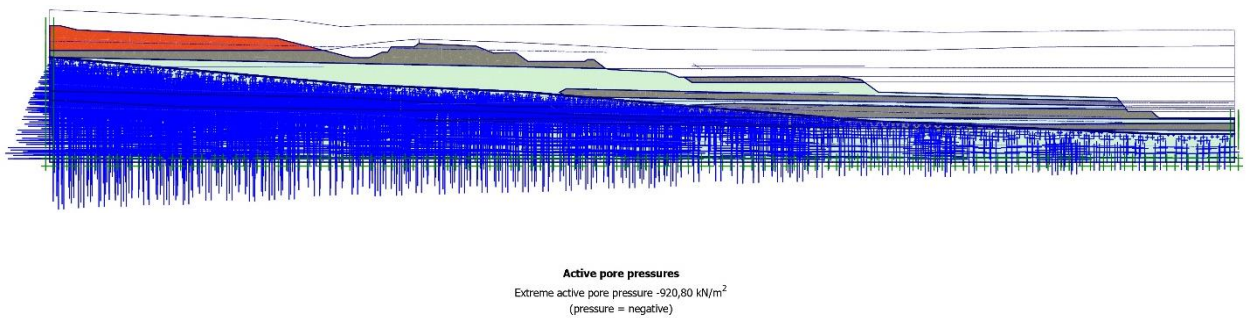
Η σταδιακή αυτή μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα εξυπηρετεί στην βαθύτερη κατανόηση της επίδρασης των αποστραγγιστικών έργων στην ευστάθεια της εκσκαφής και την εκτίμηση της απαιτούμενης ταπείνωσης της στάθμης για την βελτίωση της ευστάθειας. Η ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα συντελεί στην μείωση της πίεσης του νερού των πόρων μέσα στον εδαφικό σχηματισμό και την αύξηση της διατμητικής αντοχής.

Για την βέλτιστη εξέταση των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν από το προσομοίωμα ορισμένα σημεία ελέγχου. Αυτό αποσκοπεί στην καλύτερη κατανόηση της κατανομής των μετακινήσεων και της μεταβολής του συντελεστή ασφαλείας κατά μήκος της ανοικτής εκσκαφής. Τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος όπου επιλέχθηκαν είναι τα ίδια με τις προηγούμενες σειρές παραμετρικών αναλύσεων για άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων.

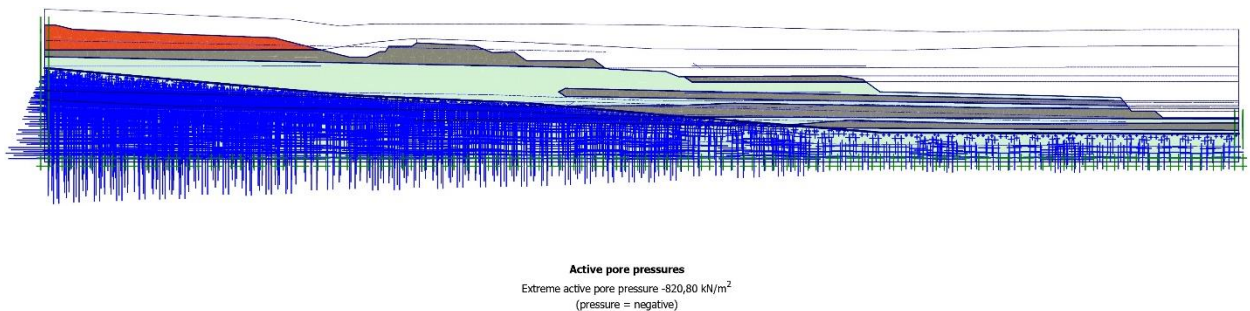
Στην Εικόνα 36 απεικονίζονται οι υδροστατικές τάσεις όπου αναπτύσσονται, συνέπεια της μείωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Στη συνέχεια, στις εικόνες 37 και 38 παρουσιάζονται οι υδροστατικές τάσεις όπου αναπτύσσονται για μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 20m και 30m αντίστοιχα, από την αρχική στάθμη.



Εικόνα 36. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 10m.



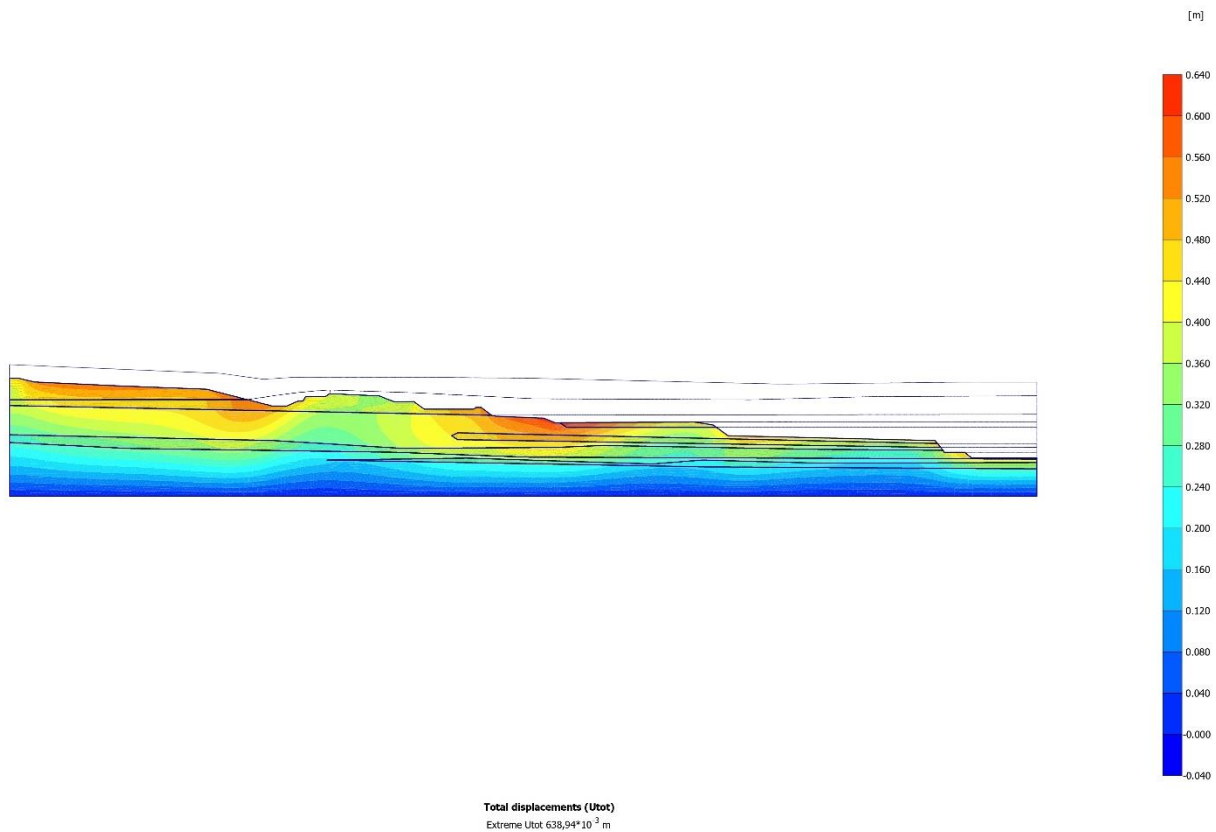
Εικόνα 37. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 20m.



Εικόνα 38. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων όπου αναπτύσσονται με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 30m.

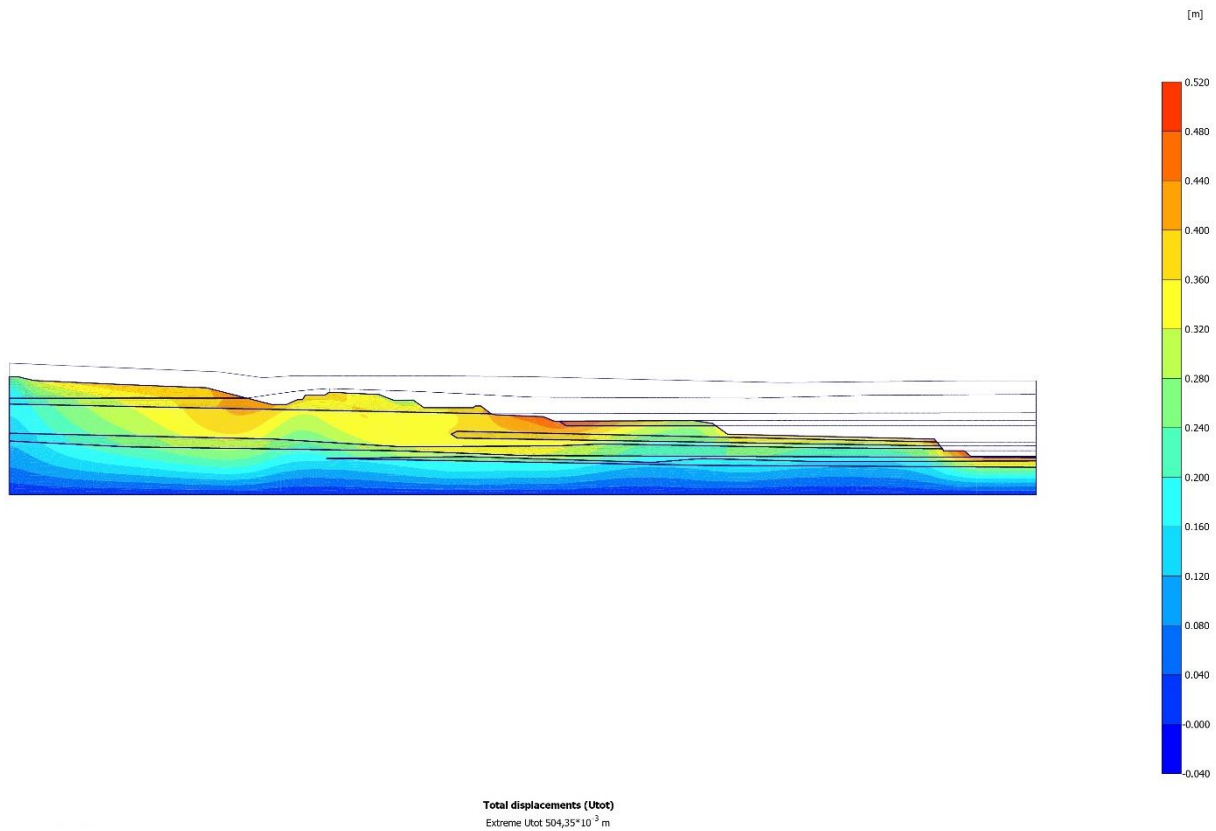
Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται το γράφημα με τις απόλυτες μετακινήσεις για μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa., σε συνθήκες όπου έχει μειωθεί η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά 10m. Στην ανάλυση αυτή εντοπίζονται επάλληλες επιφάνειες αστοχίας, τόσο στο ανώτερο τμήμα του πρανούς, όσο και στη μέση.

Τέλος, εντοπίζονται μικρότερες επιφάνειες αστοχίας στις χαμηλότερες βαθμίδες. Συνεπώς, παρατηρείται μία σταδιακή κατάρρευση και αστοχία του πρανούς συνολικά.



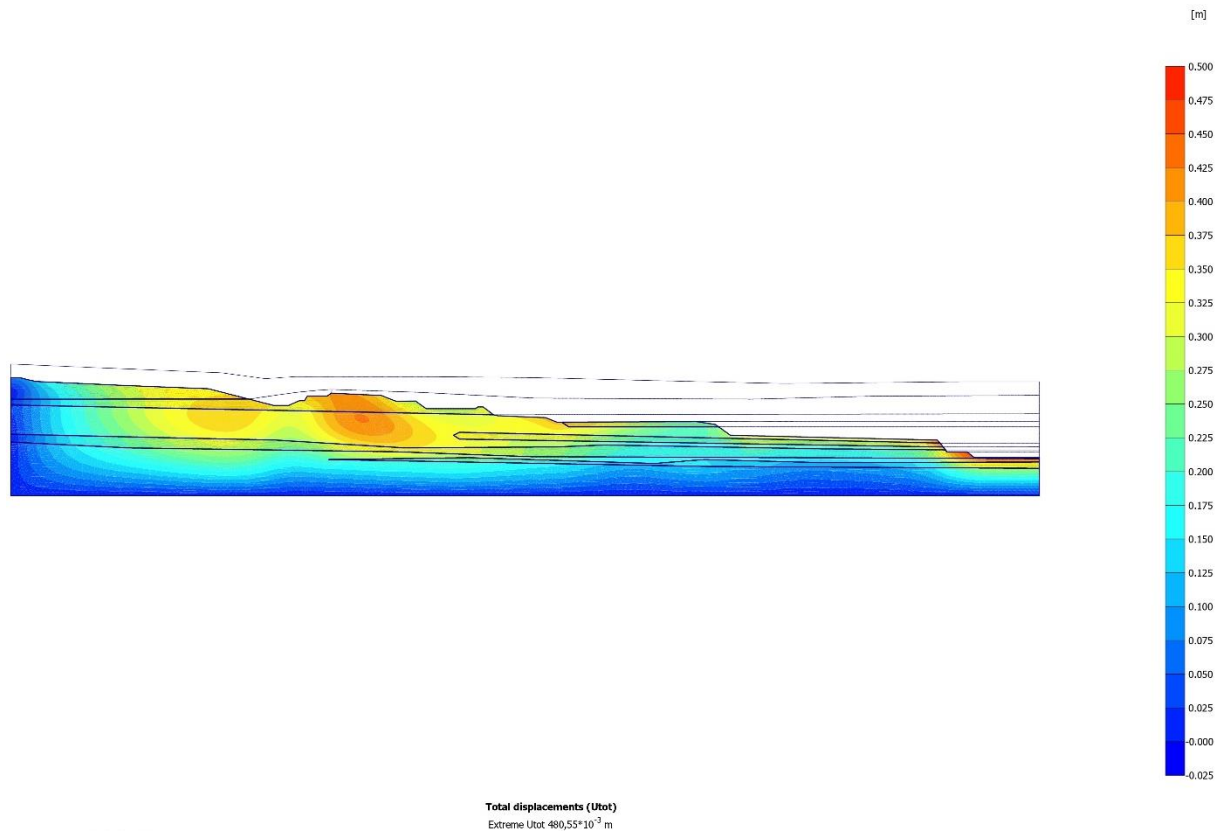
Εικόνα 39. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 10 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Αντίστοιχα, στην Εικόνα 40 παρατηρείται ότι με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 20 m, οι τελικές μετακινήσεις μειώνονται εξίσου σημαντικά σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα πέρα από την μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, συμβάλλει στην αύξηση της διατμητικής αντοχής του υλικού, ειδικότερα για σχηματισμούς όπως τα αργιλικά στρώματα. Επίσης, η πτώση της στάθμης πιθανότατα έχει μειώσει τις πιέσεις του νερού των πόρων από κρίσιμες επιφάνειες ολίσθησης. Οι επιφάνειες αστοχίας είναι μικρότερης έκτασης, ωστόσο επίσης παρατηρείται σταδιακή κατάρρευση μεγάλου τμήματος της εκσκαφής.



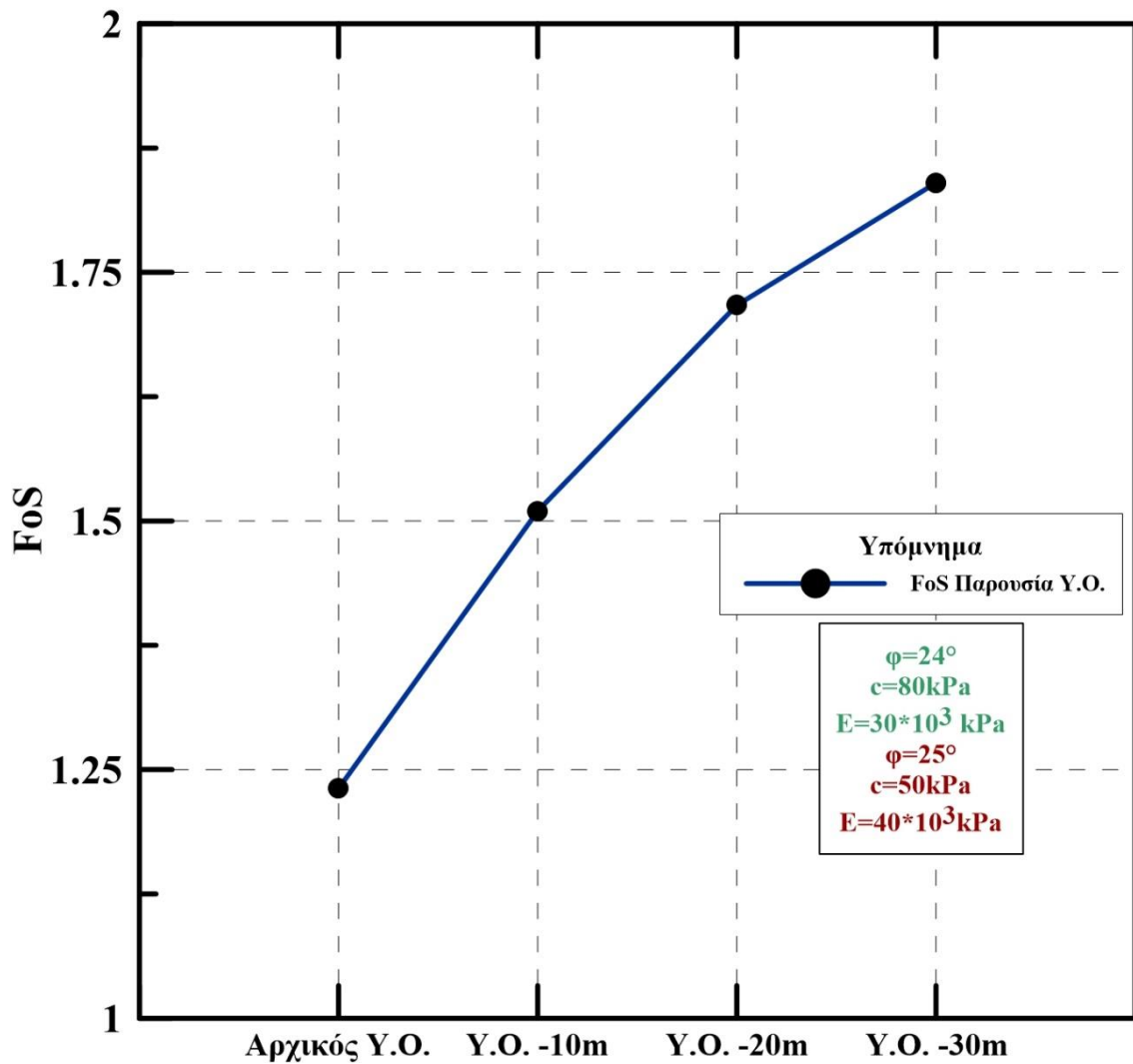
Εικόνα 40. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 20 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Τέλος, κατά την περαιτέρω πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα από τα -20m στα -30m (Εικόνα 41), οι επιφάνειες αστοχίας είναι μικρότερες σε έκταση και περιορίζονται σε επίπεδο βαθμίδας. Οι μετακινήσεις όπου εντοπίζονταν στις Τεταρτογενείς αποθέσεις ερυθρής αργίλου παρατηρείται ότι μειώνονται σημαντικά, το οποίο είναι ορατό από το διάγραμμα της Εικόνα 43, και τα σημεία ελέγχου A και B.



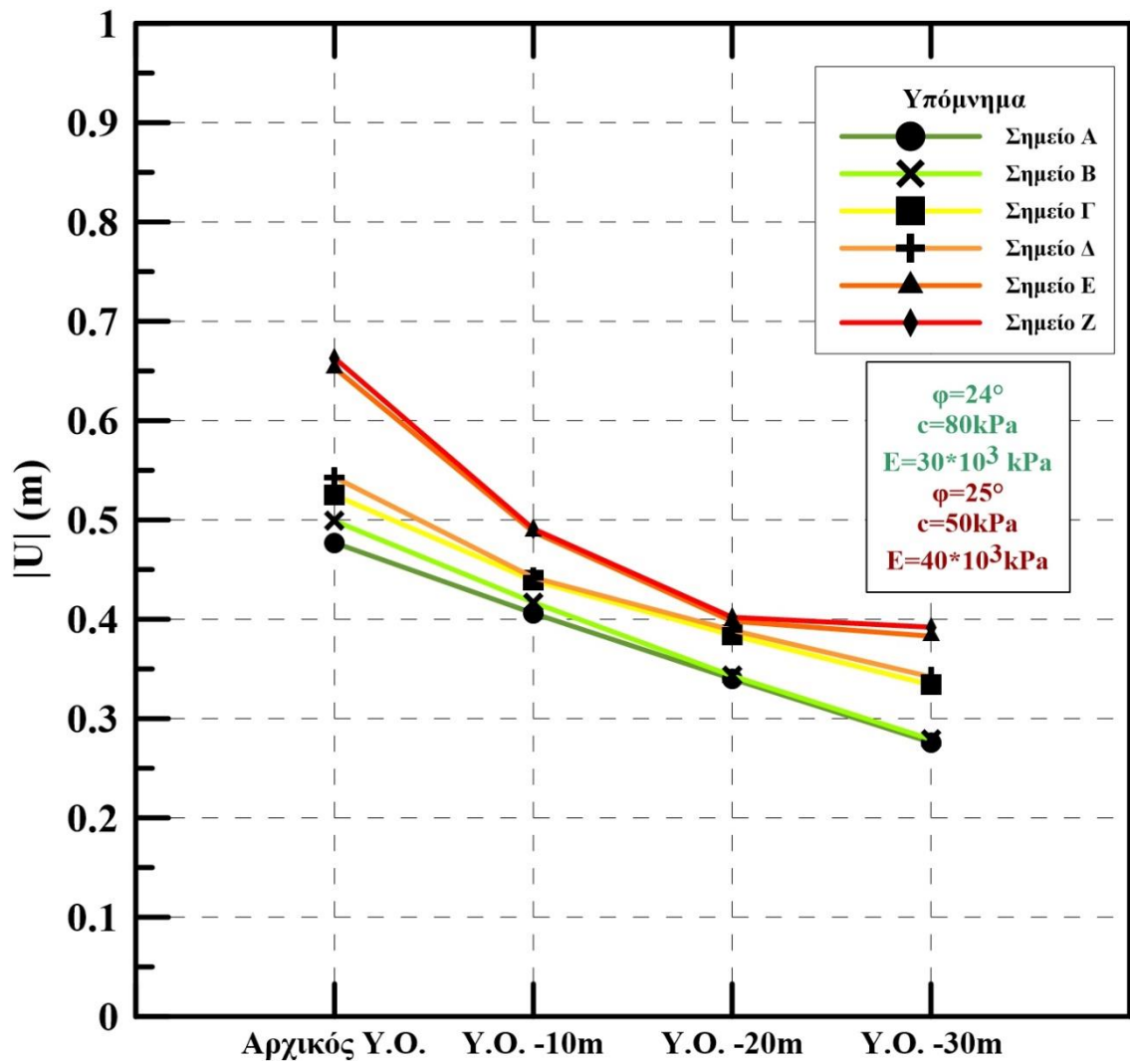
Εικόνα 41. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 30 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Στην Εικόνα 42 παρουσιάζεται μια σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας όπου προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις όπου εκτελέστηκαν. Οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας παρατηρείται ότι αυξάνονται σημαντικά σε πρώτο στάδιο κατά την ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και παρατηρείται σημαντική μετάβαση από τιμή συντελεστή ασφαλείας 1,231 σε τιμή 1,51. Ύστερα, εξίσου σημαντική μεταβολή του συντελεστή παρατηρείται κατά την περαιτέρω μείωση της στάθμης κατά 20 m. Τέλος, κατά την μετάβαση από τα 20m στα 30m εντοπίζεται ότι η απόκριση των σχηματισμών δεν είναι πλέον ίδια, και η επίδραση στην αύξηση του συντελεστή ασφαλείας είναι μικρότερη.



Εικόνα 42. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας συναρτήσει της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80 \text{ kPa}$, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000 \text{ kPa}$, και με $c=43 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000 \text{ kPa}$ για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Αντίστοιχο συμπέρασμα εξήχθη για τις παρατηρούμενες μετακινήσεις (Εικόνα 43). Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι οι συνολικές μετακινήσεις μειώνονται σταδιακά με μείωση της στάθμης του υδροφόρου. Ειδικότερα, για τα σημεία ελέγχου E και Z παρατηρείται πιο απότομη μείωση των μετακινήσεων για αρχική ταπείνωση της στάθμης του Υ.Ο. κατά 10 m, ενώ στην συνέχεια οι καμπύλες των σημείων έχουν παρόμοια κλίση με τα υπόλοιπα. Αντίθετα, για τα σημεία ελέγχου A, B, Γ και Δ παρατηρείται ότι οι απόλυτες μετακινήσεις μειώνονται εξίσου σε κάθε ανάλυση όπου η στάθμη του υδροφόρου μειώθηκε κατά 10 m.



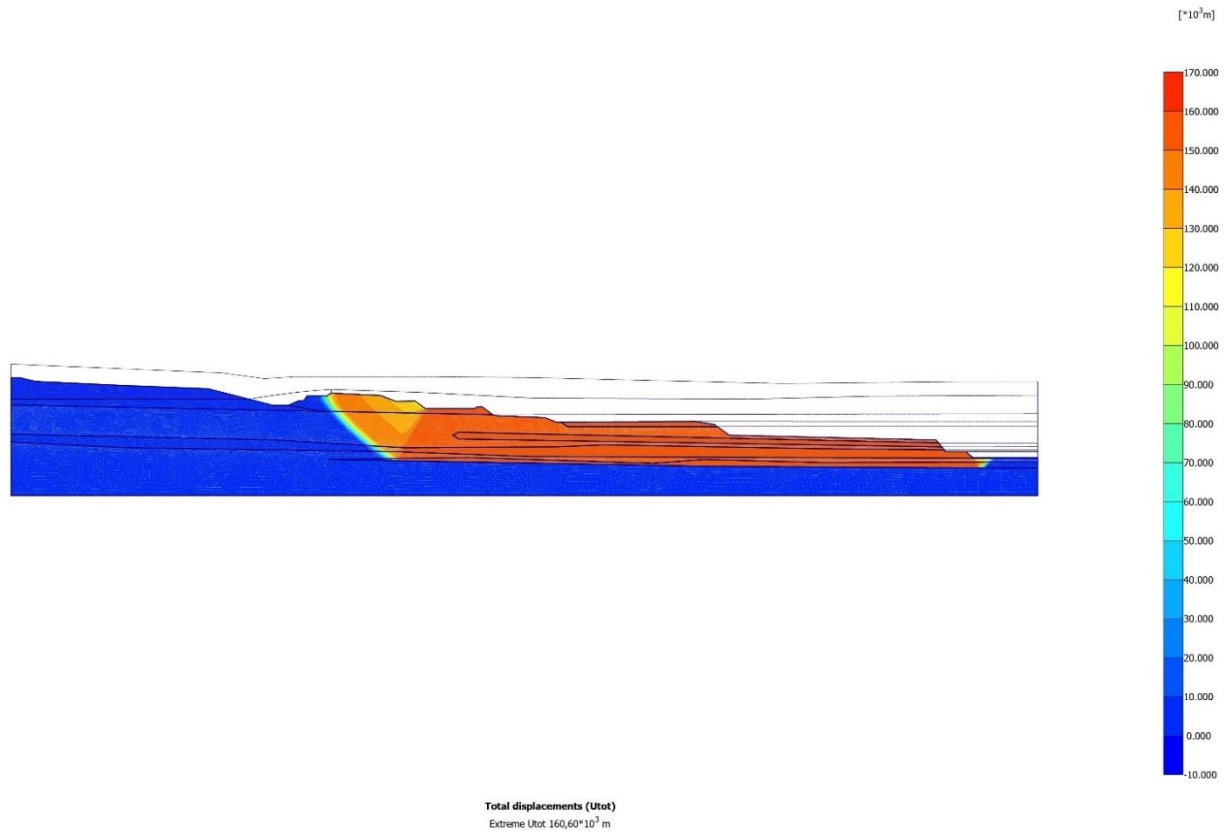
Εικόνα 43. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, συναρτήσει της στάθμης του υδροφόρου για τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.

Συγκεντρωτικά, οι συντελεστές ασφαλείας (FoS) όπου προέκυψαν από την 3^η σειρά αριθμητικών αναλύσεων όπου εκπονήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 9:37

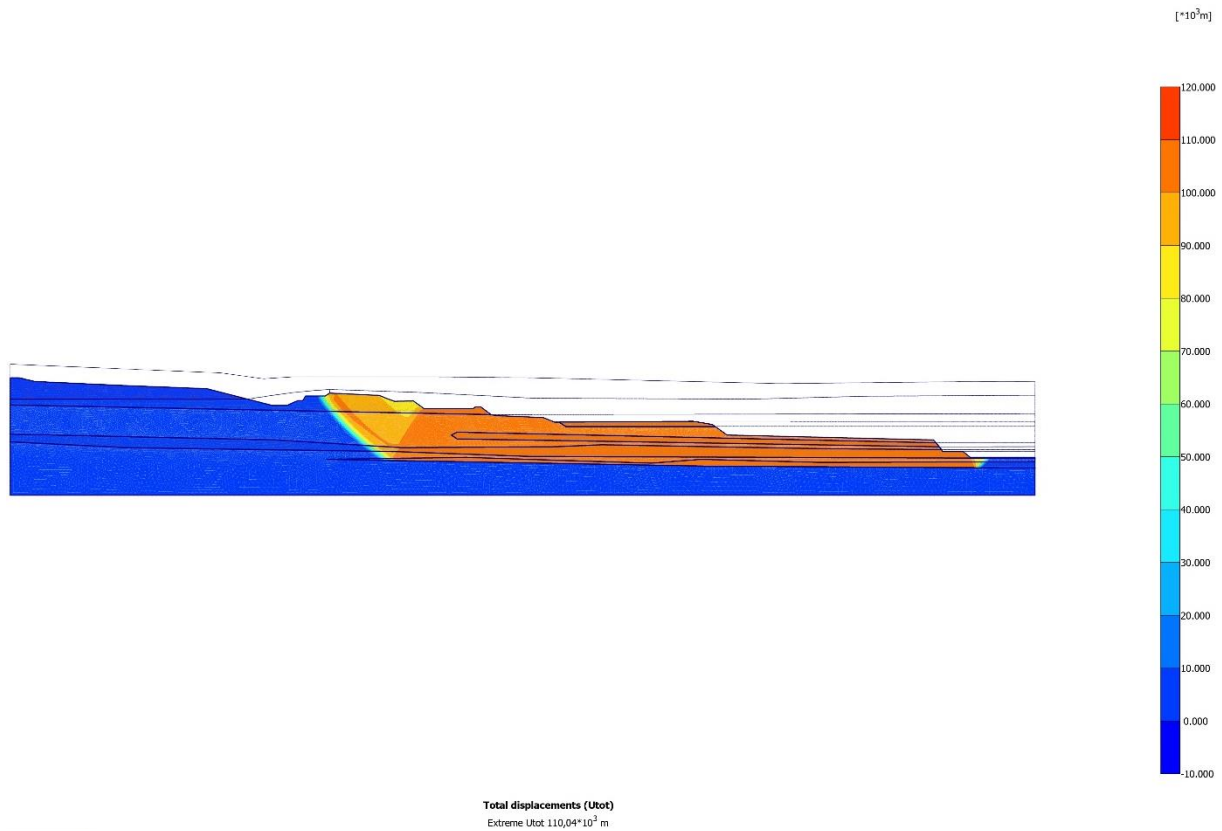
Πίνακας 9. Συγκεντρωτικός πίνακας με τους συντελεστές ασφαλείας (FoS) όπου προέκυψαν από την τρίτη σειρά αριθμητικών αναλύσεων.

Απουσία Υδροφόρου Ορίζοντα	FoS
Μηχανικές Παράμετροι	
1. Μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 10 m	1,51
2. Μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 20 m	1,717
3. Μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 30 m	1,84

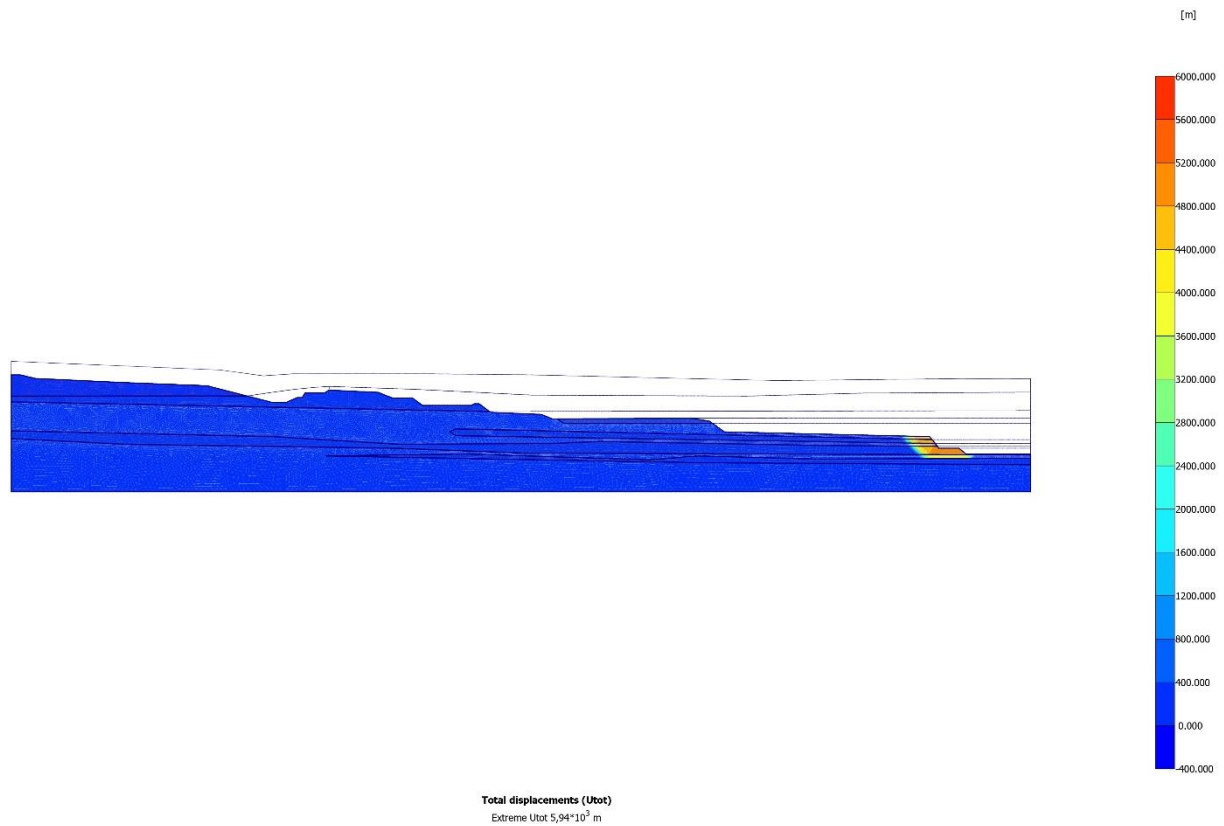
Στις εικόνες Εικόνα 44 έως Εικόνα 46 παρουσιάζονται οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της εκσκαφής. Παρατηρείται ότι η σταδιακή μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα επιφέρει μείωση της έκτασης και του μεγέθους των επιφανειών αστοχίας. Πιο συγκεκριμένα, με μείωση της στάθμης η ζώνη των πιθανών επιφανειών ολίσθησης εντοπίζεται λιγότερο διευρυμένη, κυρίως στο γράφημα της Εικόνα 46, η οποία περιορίζεται σε αστοχία κλίμακας βαθμίδων. Συνεπώς, τα ζητήματα ευστάθειας μειώνονται σημαντικά κατά την μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ 20m και 30m.



Εικόνα 44. Δονητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 10m.



Εικόνα 45. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 20m.

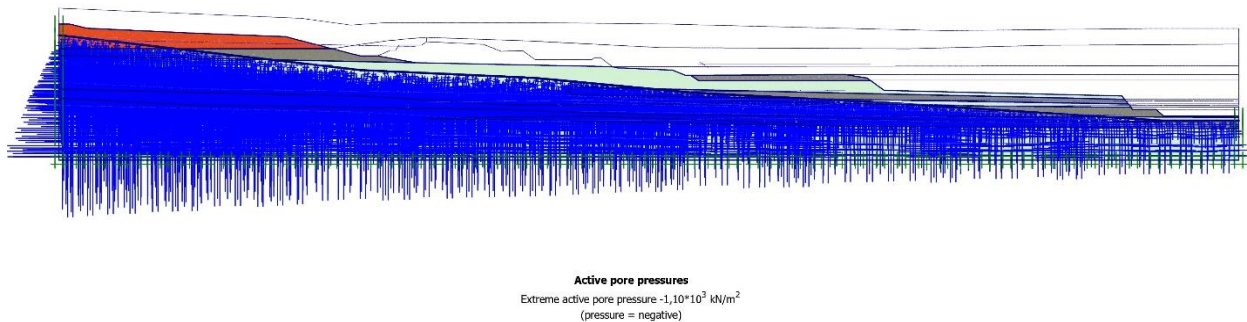


Εικόνα 46. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα κατά 30m.

Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις παρατηρείται ότι η ζώνη των δυνητικών επιφανειών διακόπτεται στην διεπιφάνεια μεταξύ των λιγνιτικών στιβάδων και των στρώσεων αργίλου. Η διακοπή αυτή πιθανότατα οφείλεται στις διαφορές των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ λιγνίτη και αργίλου.

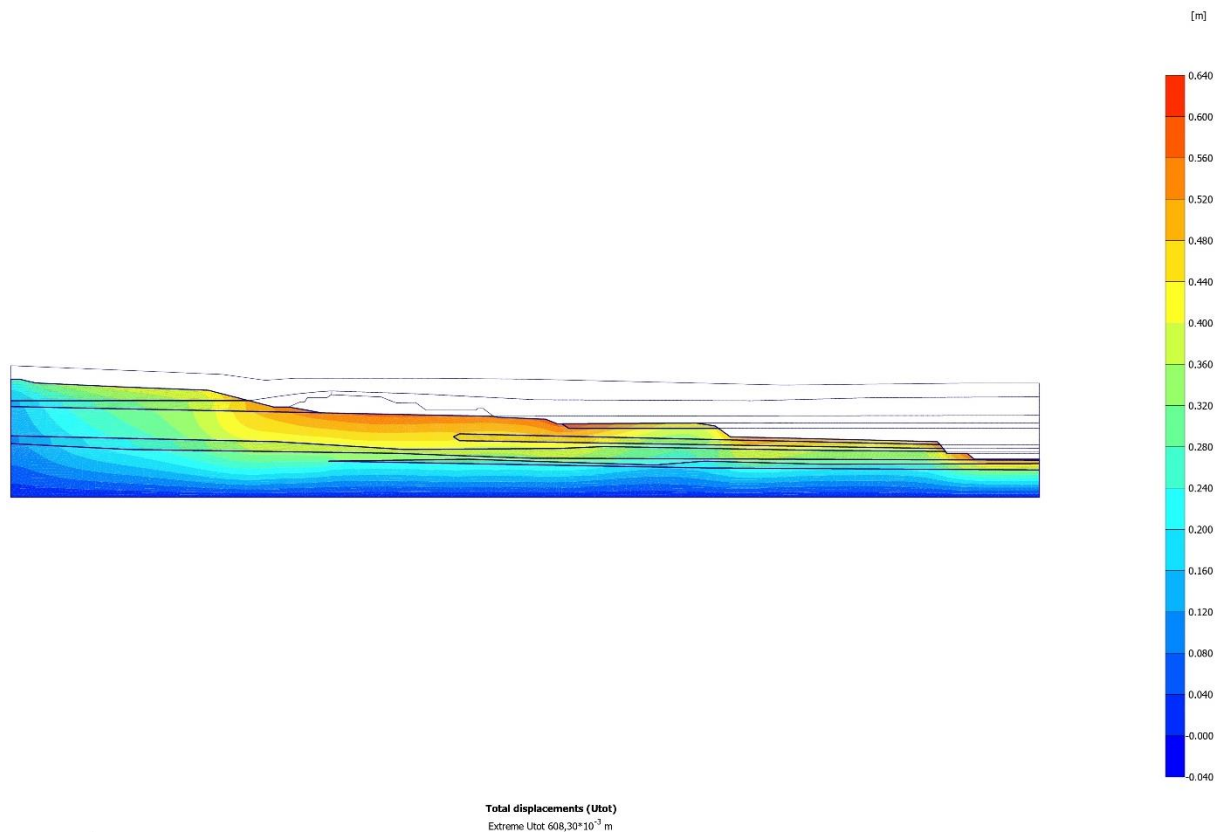
4.2.5 4^Η ΣΕΙΡΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ – ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΤΗΣ ΑΝΟΙΚΤΗΣ ΕΚΣΚΑΦΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΗΠΙΟΤΕΡΩΝ ΚΛΙΣΕΩΝ

Σε αυτή τη σειρά παραμετρικών αναλύσεων διερευνάται η επίδραση της μεταβολής της γεωμετρίας της ανοικτής εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται η επίδραση της αφαίρεσης υλικού από ανώτερα στρώματα και βαθμίδες, στη περίπτωση αυτή ένα τμήμα της ανώτερης στιβάδας λιγνίτη, στα πλαίσια διαμόρφωσης ηπιότερων κλίσεων στην εκσκαφή. Τα μέτρα αυτά αποσκοπούν στην μείωση του φορτίου όπου φέρουν τα πρανή, τον περιορισμό των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων και την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας. Η 4^η σειρά αναλύσεων, όπως και η 3^η εκτελέστηκαν για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου. Στην Εικόνα 47 απεικονίζονται οι υδροστατικές τάσεις όπου αναπτύσσονται στο προσομοίωμα, από το οποίο έχει αφαιρεθεί τμήμα της ανώτερης στιβάδας λιγνίτη. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες αλλαγές στην αρχική στάθμη του προσομοιώματος συγκριτικά με την 2^η σειρά αναλύσεων.



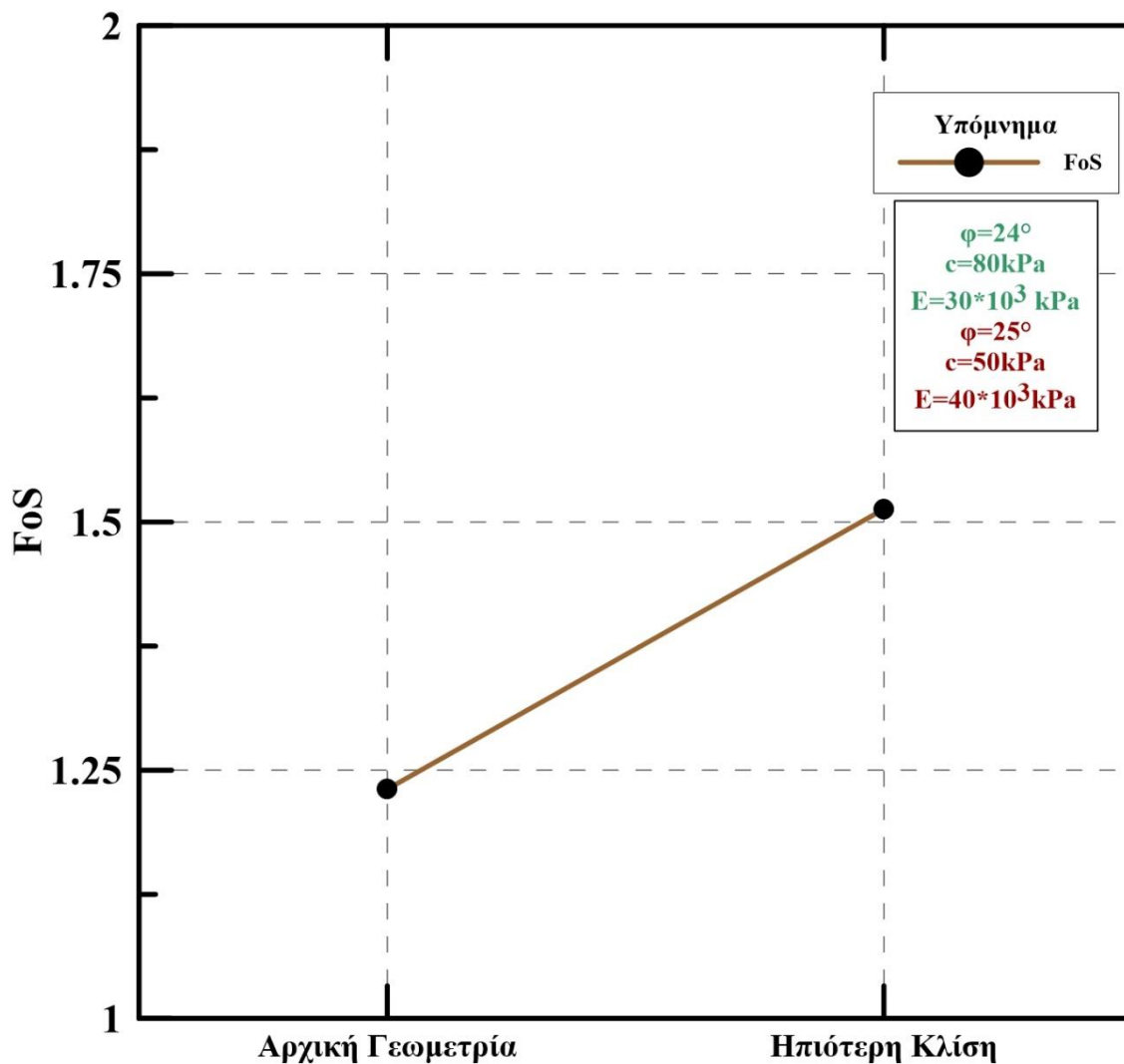
Εικόνα 47. Απεικόνιση των υδροστατικών τάσεων του προσομοιώματος.

Στην Εικόνα 48 παρουσιάζεται το γράφημα με τις απόλυτες μετακινήσεις για μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa., σε συνθήκες όπου έχει αφαιρεθεί τμήμα από την ανώτερη στιβάδα λιγνίτη. Στο γράφημα παρατηρείται ότι οι μετακινήσεις μειώθηκαν επιτυχώς στις βαθύτερες βαθμίδες της ανοικτής εκσκαφής. Όμως, λόγω της αφαίρεσης του υλικού όπου προσέφερε σταθερότητα στις ανώτερες βαθμίδες, οι μετακινήσεις αν και μικρότερου μεγέθους είναι αυξημένες σε αυτή την περιοχή.



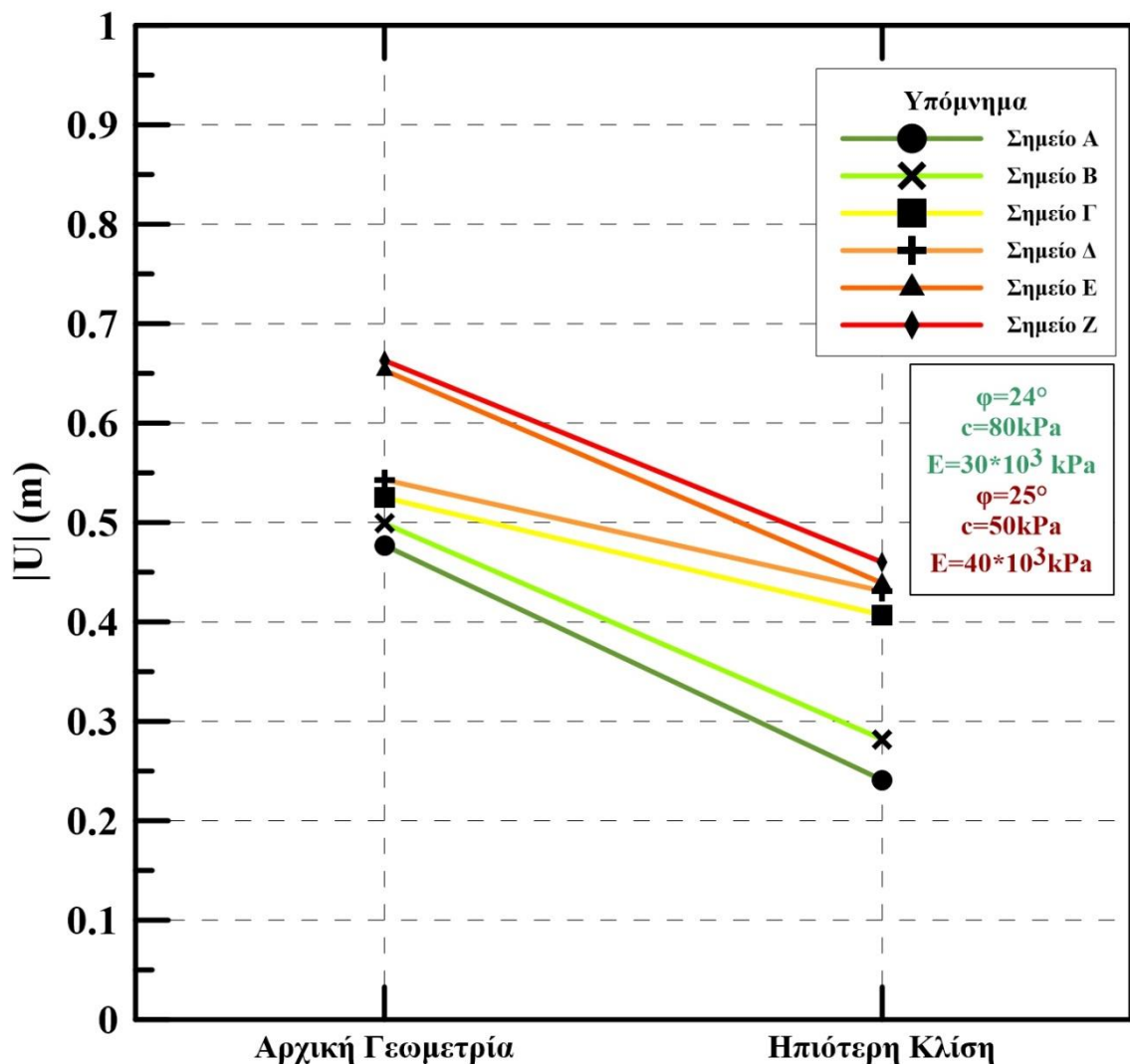
Εικόνα 48. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με αφαίρεση τμήματος της ανώτερης λιγνιτικής στιβάδας, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Στην Εικόνα 49 παρουσιάζεται μια σύγκριση του αρχικού συντελεστή ασφαλείας από την 2^η σειρά παραμετρικών αναλύσεων και από την αριθμητική ανάλυση όπου εκτελέστηκε στην 4^η σειρά. Η τιμή του συντελεστή ασφαλείας παρατηρείται ότι αυξάνεται σημαντικά και η οριακά αποδεκτή τιμή του συντελεστή ευστάθειας (1,231) αυξάνεται. Λαμβάνοντας υπόψη και την Εικόνα 48, η τιμή 1.52 του συντελεστή ασφαλείας υποδεικνύει ότι παρά τις δυσμενείς υδροστατικές τάσεις όπου ασκούνται από τα υπόγεια ύδατα, οι συνθήκες ευστάθειας μπορούν να μετριασθούν με την μείωση της κλίσης του πρανούς και την αφαίρεση υλικού.



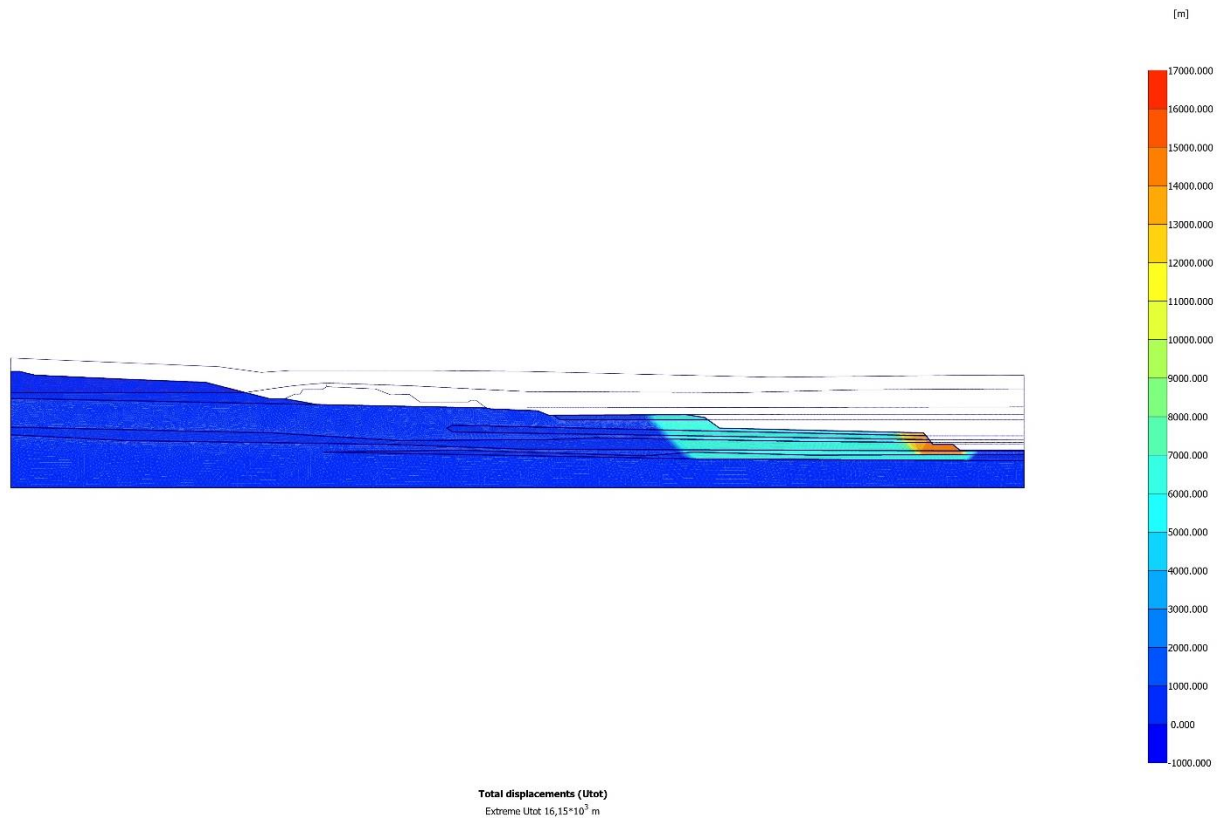
Εικόνα 49. Σύγκριση των συντελεστών ασφαλείας συναρτήσει της γεωμετρίας της ανοικτής εκσκαφής, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80 \text{ kPa}$, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000 \text{ kPa}$, και με $c=43 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000 \text{ kPa}$ για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Στην Εικόνα 50 παρατηρείται ότι στο συγκριτικό διάγραμμα των απόλυτων μετακινήσεων, η αφαίρεση υλικού και η διαμόρφωση ηπιότερων κλίσεων στα πρανή επιδρούν θετικά στο ζήτημα των μετακινήσεων και των ζητημάτων ευστάθειας, με αποτέλεσμα οι απόλυτες μετακινήσεις να μειώνονται σημαντικά σε όλα τα σημεία ελέγχου του προσομοιώματος.



Εικόνα 50. Σύγκριση των απόλυτων μετακινήσεων, συναρτήσει της γεωμετρίας της ανοικτής εκσκαφής, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80 \text{ kPa}$, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000 \text{ kPa}$, και με $c=43 \text{ kPa}$, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000 \text{ kPa}$ για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

Στις Εικόνα 51 παρουσιάζονται οι δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της εκσκαφής. Παρατηρείται ότι η αφαίρεση υλικού από τις ανώτερες βαθμίδες και η μεταβολή της γεωμετρίας, με τη διαμόρφωση ηπιότερων κλίσεων στα πρανή επιδρά θετικά στην ευστάθεια. Πιο συγκεκριμένα, με διαμόρφωση ηπιότερων κλίσεων, η ζώνη των πιθανών επιφανειών ολίσθησης εντοπίζεται λιγότερο διευρυμένη και σε μικρότερη έκταση από την περίπτωση με την αρχική γεωμετρία της εκσκαφής.



Εικόνα 51. Δυναμικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου στην περίπτωση αφαίρεσης υλικού και εφαρμογής ηπιότερων κλίσεων.

4.3 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΜΕΤΡΑ

Η διαχείριση της ευστάθειας των πρηνών στο λιγνιτικό κέντρο Μεγαλόπολης απαιτεί έναν συνδυασμό σχεδιασμένων πρακτικών, όσον αφορά τον σχεδιασμό της ανοικτής εκσκαφής, της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων και τις στρατηγικές παρακολούθησης της ευστάθειας. Στη παρούσα υποενότητα περιγράφονται οι λύσεις όπου προέκυψαν από τις τέσσερις σειρές αναλύσεων.

Όπως αποδεικνύεται από τις αναλύσεις, το επίπεδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η γεωμετρία της εκσκαφής όπου επιλέγεται διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην δημιουργία επιφανειών ολίσθησης ανάλογα με τις κλίσεις εκσκαφής. Σε περιοχές του ορυχείου όπου παρατηρούνται αυξημένα ζητήματα ευστάθειας και μετακινήσεων προτείνεται η υιοθέτηση ενός περισσότερο συντηρητικού σχεδιασμού, όπου οι κλίσεις των πρηνών είναι ηπιότερες. Η τακτική αυτή συντελεί στην μείωση της συγκέντρωσης τάσεων στον πόδα των πρηνών και κατά μήκος της εκσκαφής. Αντίθετα, κατά την θερινή περίοδο όπου οι πιεζομετρικές στάθμες είναι συγκριτικά χαμηλότερες και η διαχείριση των υπογείων υδάτων είναι ευμενέστερη, η προσωρινή υιοθέτηση ενός λιγότερο συντηρητικού σχεδιασμού των πρηνών με αυξημένες κλίσεις δεν θεωρείται απαγορευτική.

Παράλληλα, ο έλεγχος της στάθμης του υδροφόρου και της παρουσίας των υπογείων υδάτων στο εσωτερικό των σχηματισμών είναι υψίστης σημασίας για τη διασφάλιση της ευστάθειας των υπό εκμετάλλευση πρηνών. Με την εγκατάσταση επιφανειακών αντλιοστασίων και την πραγματοποίηση αποστραγγιστικών γεωτρήσεων περιμετρικά της εκσκαφής, τα υπόγεια ύδατα συστήνεται να αντλούνται, με αποτέλεσμα την ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Η πρακτική αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα ωφέλιμη για την αύξηση του συντελεστή ασφαλείας στα πρηνή. Το υπόγειο νερό όπου αντλείται μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη των αναγκών των ατμοηλεκτρικών εργοστασίων του λιγνιτικού κέντρο. Τέλος, ένα ποσοστό των υπόγειων υδάτων, αλλά και των επιφανειακών μπορούν κατόπιν ελέγχου των ποιοτικών τους χαρακτηριστικών να διοχετευτούν σε επιφανειακούς φυσικούς αποδέκτες, όπως ο Αλφειός Ποταμός. Ο έλεγχος των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων αποτελεί βασικό παράγοντα για την διοχέτευση τους σε φυσικούς αποδέκτες, καθώς είναι αναγκαίος ο έλεγχος σε ρυπογόνες ουσίες λόγω της εκμετάλλευσης του λιγνίτη και της απόθεσης στείρων υλικών, όπως η τέφρα.

4.3.1 ΚΑΙΝΟΤΟΜΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΩΝ

4.3.1.1 ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΡΑΝΤΑΡ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΟΣ (InSAR)

Το συμβολομετρικό ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR) αποτελεί μια εξελιγμένη τεχνική τηλεπισκόπηση, το οποίο χρησιμοποιεί τα δεδομένα των δορυφόρων (SAR), δηλαδή εικόνες της επιφάνειας της Γης, μέσω της εκπομπής σημάτων ραντάρ και λαμβάνοντας πίσω το ανακλώμενο σήμα. Κινούμενοι συνεχώς σε τροχιά γύρω από τον πλανήτη σε υψόμετρο περίπου 800 χιλιομέτρων, οι δορυφόροι συλλέγουν πολλαπλές εικόνες της ίδιας περιοχής με την πάροδο του χρόνου. Ο χρόνος όπου απαιτείται για έναν δορυφόρο να επανέλθει πάνω από την ίδια περιοχή ονομάζεται 'χρόνος επανεπίσκεψης'.

Η σχεδόν πολική τροχιά των δορυφόρων SAR τους επιτρέπει να ταξιδεύουν από τον Βόρειο προς τον Νότιο πόλο για το μισό της τροχιάς τους (καθοδική τροχιά) και από τον Νότιο προς τον Βόρειο πόλο κατά τη διάρκεια του υπολοίπου της τροχιάς (ανοδική τροχιά). Έτσι, η ίδια περιοχή μπορεί να παρατηρηθεί από δύο διαφορετικές κατευθύνσεις.

Τα συστήματα αυτά βασίζονται στη μέτρηση της αλλαγής φάσης του σήματος ή της παρεμβολής, με την πάροδο του χρόνου. Όταν ένα σημείο στο έδαφος μετακινείται, η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του σημείου στο έδαφος αλλάζει, όπως επίσης και η φάση του σήματος του ραντάρ. Έτσι η τιμή που καταγράφεται από έναν αισθητήρα SAR που πετά κατά μήκος μιας σταθερής τροχιάς θα επηρεαστεί επίσης.

Δεδομένης της συστηματικής κάλυψης της αποστολής Copernicus Sentinel-1, σήμερα, πολλά μέρη του κόσμου διαθέτουν μακρά σειρά δεδομένων για συμβολομετρία ραντάρ (InSAR) (Foumelis et al., 2022b). Οι τεχνικές InSAR στοχεύουν στην εξαγωγή της κίνησης της επιφάνειας από τις εικόνες SAR. Η ικανότητα της τεχνικής InSAR να μετρά τις μετακινήσεις της επιφάνειας με ακρίβεια σε επίπεδο χιλιοστών έχει αποδειχθεί επαρκώς κατά τις δύο τελευταίες δεκαετίες (Vassilakis et al., 2020; Modeste et al., 2021). Πλέον, οι τεχνικές InSAR αποτελούν σημαντικό εργαλείο στην διαχείριση των γεωκινδύνων, και την παρακολούθηση καθιζήσεων και μετακινήσεων (Havivi et al., 2022).

Χάρη στη πληθώρα αποστολών δορυφόρων SAR, όπως οι Copernicus Sentinels, η κυκλοφορία του EGMS (European Ground Motion Service), το οποίο χρησιμοποιεί τα δεδομένα ραντάρ συμβολομετρίας, στοχεύει στην ανίχνευση και τη μέτρηση των εδαφικών κινήσεων στον Ευρωπαϊκό χώρο με ακρίβεια χιλιοστού (Crosetto et al., 2020).

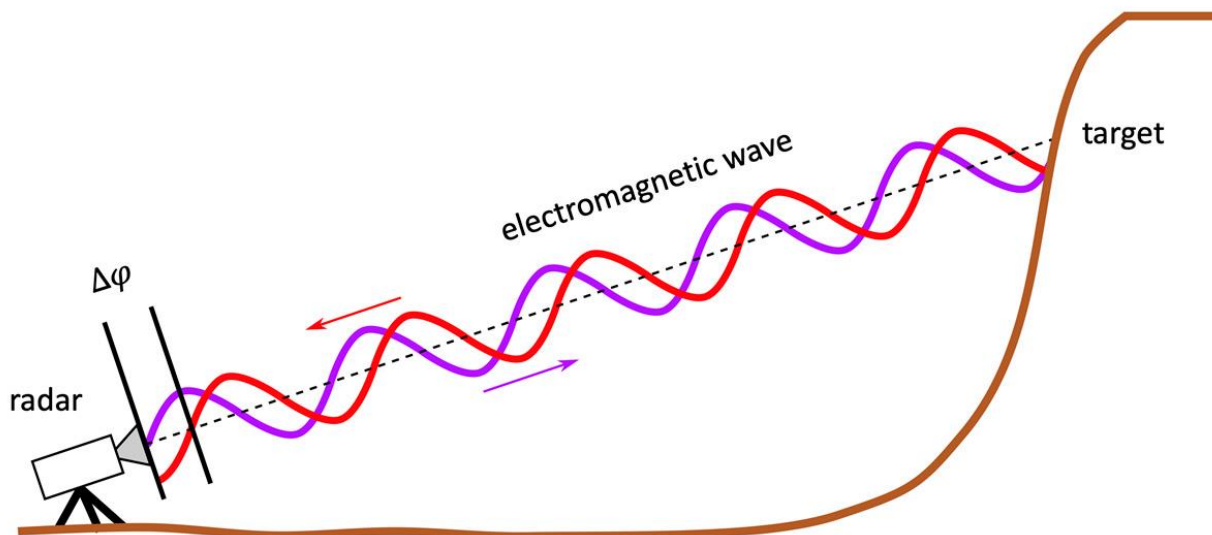
Όπως γίνεται αντιληπτό, η ανάλυση των δεδομένων συμβολομετρίας για την εξαγωγή συμπερασμάτων απαιτεί εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό (Foumelis et al., 2022b). Η ανάπτυξη πλατφορμών και αλγορίθμων όπου μετατρέπουν τα δορυφορικά δεδομένα παρατήρησης σε άμεσα χρήσιμη πληροφορία καθιστά πλέον τη χρήση των δορυφορικών δεδομένων άμεσα αξιοποιήσιμη (Morishita et al., 2020).

Λόγω της ικανότητάς του να καλύπτει μεγάλες εκτάσεις γης, η συμβολομετρία ραντάρ InSAR καθίσταται επωφελής για ορυχεία ανοικτής εκσκαφής, όπως το λιγνιτικό κέντρο Μεγαλόπολης. Το InSAR αποτελεί μια περισσότερο οικονομικά βιώσιμη λύση με την πάροδο του χρόνου, όπου η ανάπτυξη επίγειων οργάνων παρακολούθησης είναι οικονομικά απαιτητική. Τέλος, αποτελεί χρήσιμο εργαλείο και για την παρατήρηση των εδαφικών μετακινήσεων στην περιοχή γύρω από το χώρο εκμετάλλευσης, όπως οι οικισμοί στις δυτικές παρυφές του λιγνιτορυχείου.

4.3.1.2 ΧΡΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η χρήση συστημάτων συμβολομετρίας για την παρακολούθηση εδαφικών μετακινήσεων αποτελεί μία διαδεδομένη μέθοδο τηλεπισκόπησης. Τις δύο τελευταίες δεκαετίες, μια νέα μέθοδος τηλεπισκόπησης μετακινήσεων σε ανοιχτές εκσκαφές αναδύεται, η χρήση συστημάτων συμβολομετρίας εδάφους GBRI (Ground Based Radar Interferometry) (Pieraccini & Miccinesi, 2019).

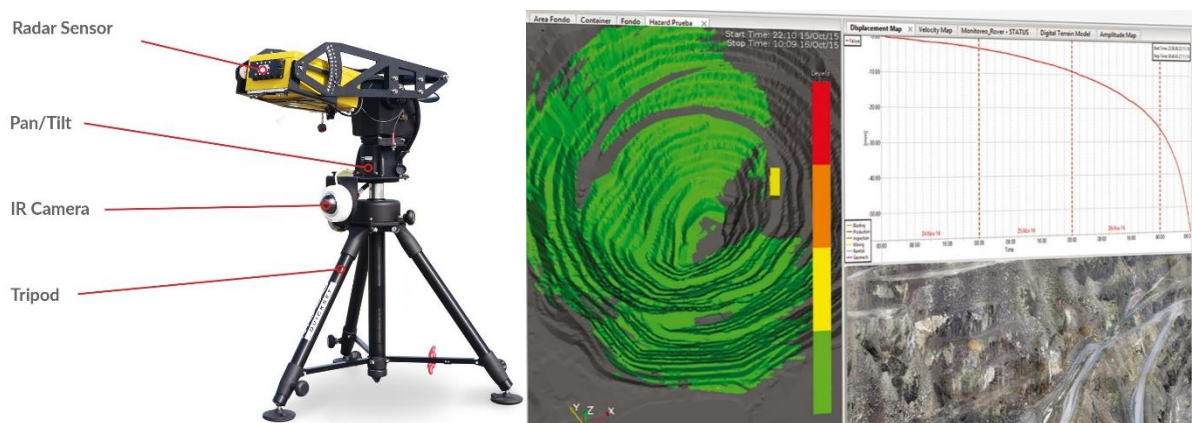
Η χρήση συμβολομετρίας εδάφους, σε αντίθεση με τα δορυφορικά δεδομένα InSAR, ενδείκνυται για την παρακολούθηση μικρότερων περιοχών, όπως τα πρανή του ορυχείου στα οποία εντοπίζονται ζητήματα ευστάθειας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Ο εξοπλισμός του συστήματος εκπέμπει σήματα προς ένα ορισμένο στόχο, στην προκειμένη περίπτωση ένα πρανές του ορυχείου, όπου μέσω της διαφοράς φάσης των εκπεμπόμενων σημάτων υπολογίζονται μετακινήσεις μικρής κλίμακας (Corsini et al., 2006; Carlà et al., 2019). Η βασική αρχή λειτουργίας των συστημάτων αυτών παρουσιάζεται στην Εικόνα 52.



Εικόνα 52. Βασική αρχή λειτουργίας συστημάτων συμβολομετρίας εδάφους (Pieraccini & Miccinesi, 2019).

Η επίδραση της ατμοσφαιρικών συνθηκών στην ακρίβεια του σήματος μπορεί να παραβλεφθεί για αποστάσεις της τάξεως των 100 έως 200 m (Iannini & Guarnieri, 2011). Όπως και στην περίπτωση των συμβολομετρικών δεδομένων (InSAR), τα συστήματα συμβολομετρίας εδάφους βασίζονται στη μέτρηση της αλλαγής φάσης του σήματος ή της παρεμβολής, με την πάροδο του χρόνου. Όταν ένα σημείο στο έδαφος μετακινείται, η απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και του σημείου στο έδαφος αλλάζει, όπως επίσης και η φάση του σήματος του ραντάρ.

Ανάλογα με τον τύπο του συστήματος, ο αισθητήρας επιτρέπεται να πραγματοποιεί κατακόρυφη ή οριζόντια κίνηση, διευρύνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την έκταση της περιοχής όπου εξετάζεται.



Εικόνα 53. Σύστημα GBRI της εταιρίας IDS Georadar, εξοπλισμένο με αισθητήρα ραντάρ και IR αισθητήρα, για παρακολούθηση της ευστάθειας σε πραγματικό χρόνο (IDS GeoRadar, 2024).

Η χρήση συστημάτων GBRI μπορεί να προσφέρει δεδομένα υψηλής ανάλυσης σχετικά με την ανίχνευση μικρών μετακινήσεων που μπορεί να προηγούνται μεγαλύτερων ασταθειών ή αστοχιών. Σε αντίθεση με τα δεδομένα InSAR, τα δεδομένα όπου προσφέρει σε σχεδόν πραγματικό χρόνο λόγω των ανιχνευόμενων κινήσεων, το καθιστούν ένα εργαλείο με άμεσο χαρακτήρα. Επίσης, με την ολόημερη αδιάκοπη λειτουργία του, ανεξαρτήτων καιρικών συνθηκών, λαμβάνονται συνεχώς δεδομένα προς επεξεργασία.

Τέλος, η χρήση συμβολομετρικών δεδομένων εδάφους GBRI μπορεί να λειτουργήσει ως σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης, χάρη στον ορισμό ορίων μετακίνησης, για την άμεση λήψη των απαραίτητων μέτρων για μετριασμό των μετακινήσεων.

Συμπερασματικά, η χρήση των συστημάτων GBRI για την παρακολούθηση των μετακινήσεων των πρανών σε ανοιχτές εκσκαφές δεν θεωρείται ότι ακόμη δεν λαμβάνεται υπόψιν σε μεγάλο βαθμό. Παρόλα αυτά, η χρήση τους για την παρακολούθηση πρανών με ζητήματα ευστάθειας και ως εξοπλισμός όπου συντελεί στην βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας σε χώρους εκμετάλλευσης αρχίζει ολοένα να αυξάνεται.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αναφορικά με την βιβλιογραφική αναδρομή για τα ατυχήματα στη μεταλλευτική βιομηχανία, κοινό χαρακτηριστικό στην πλειοψηφία αυτών ήταν το πρώιμο στάδιο σχετικά με τους κανονισμούς ασφαλείας ενός ορυχείου και η περιορισμένη γνώση σε ζητήματα μηχανικής, ιδιαίτερα κατά την περίοδο 1900-1975.

Στην σύγχρονη εποχή, η απόκτηση τεχνογνωσίας, η βελτίωση των δυνατοτήτων του μηχανικού εξοπλισμού και η θέσπιση κανονισμών έχει συντελέσει στην αύξηση της ασφάλειας των εργαζομένων. Πλέον, οι επιπτώσεις της μεταλλευτικής στην υγεία των εργαζομένων, και το αντίκτυπο στο περιβάλλον και την κοινωνία αποτελούν ζητήματα υψίστης σημασίας.

Σημαντική συμβολή στη μείωση των ατυχημάτων και βελτίωση των συνθηκών ασφαλείας στη μεταλλευτική βιομηχανία έχουν διαδραματίσει η άνοδος της τεχνολογίας και η ανάπτυξη των αριθμητικών αναλύσεων. Σε αντίθεση με το παρελθόν, οι αριθμητικές αναλύσεις αποτελούν τον πλέον διαδεδομένο και αξιόπιστο τρόπο επίλυσης γεωτεχνικών ζητημάτων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM) αποδεικνύεται ότι είναι ικανή να προσφέρει λύσεις σε γεωτεχνικά ζητήματα, όπως ο υπολογισμός της ευστάθειας ανοικτών εκσκαφών σε δισδιάστατα μοντέλα. Πέρα από την πρόβλεψη της ευστάθειας του πρανούς, ο υπολογισμός των παραμορφώσεων και των μετακινήσεων της εκσκαφής επίσης μπορούν να υπολογιστούν. Τέλος, είναι δυνατή η πραγματοποίηση παραμετρικών αναλύσεων, όπου δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές παραμέτρων και λύσεων, με στόχο την επιλογή της ασφαλέστερης και οικονομικότερης απόφασης.

Σχετικά με την περιοχή μελέτης και τις αναλύσεις όπου πραγματοποιήθηκαν, εξάγονται συμπεράσματα για τους παράγοντες όπου επιδρούν στην ευστάθεια της ανοικτής εκσκαφής στο πεδίο Χωρεμίου του Λιγνιτικού Κέντρου Μεγαλόπολης. Οι αναλύσεις αυτές υποδεικνύουν τη σημαντική επίδραση των μηχανικών ιδιοτήτων των αργιλικών στρώσεων και των Τεταρτογενών αποθέσεων ερυθρής αργίλου. Πιο συγκεκριμένα, υψηλές τιμές εσωτερικής γωνίας τριβής και συνοχής οδηγούν σε αυξημένες τιμές του συντελεστή ασφαλείας. Αντίθετα, το μέτρο ελαστικότητας φαίνεται να έχει αυξημένη επίδραση στις παρατηρούμενες μετακινήσεις, όπου αυξημένες τιμές του E οδηγούσαν σε χαμηλότερες συνολικές μετακινήσεις στο προσομοίωμα. Από τις δύο πρώτες σειρές αναλύσεων εντοπίζονται διακριτές διαφορές στην ευστάθεια της εκσκαφής λόγω των διαφορετικών γεωτεχνικών συνθηκών όπου επικρατούν, όπου απουσία υδροφόρου ορίζοντα, οι τιμές του συντελεστή ασφαλείας κυμαίνονταν μεταξύ 1,5 και 2. Αντίθετα, με εισαγωγή υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα επικρατούν οριακές συνθήκες ευστάθειας.

Ακόμα, η γεωμετρία της εκσκαφής και των πρανών, καθώς και η διαχείριση των υπογείων υδάτων αναδεικνύονται ως κομβικές πτυχές στη διατήρηση της ευστάθειας. Με λειτουργία επιφανειακών αντλιοστασίων και την πραγματοποίηση αποστραγγιστικών γεωτρήσεων περιμετρικά της εκσκαφής, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινώνεται και οι πιέσεις του νερού των πόρων από κρίσιμες επιφάνειες ολίσθησης μειώνονται. Όταν η διαχείριση των υπογείων υδάτων συνοδεύει από την κατάλληλη διαμόρφωση των κλίσεων στα πρανή της εκσκαφής, τότε οι συνθήκες ευστάθειας βελτιώνονται σημαντικά. Συνεπώς, ο κατάλληλος συνδυασμός των δύο αυτών λύσεων επιδρά θετικά στα ζητήματα ευστάθειας όπου εντοπίζονται εντός της περιοχής μελέτης.

Με τις ανάλογες αποφάσεις όσον αφορά την αλλαγή της γεωμετρίας της εκσκαφής, και την ταπείνωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα αποδείχτηκε ότι ο συντελεστής ασφαλείας αυξάνεται και οι μετακινήσεις περιορίζονται σημαντικά. Η διαμόρφωση ηπιότερων κλίσεων στα πρανή και η αφαίρεση υλικού από τις ανώτερες και ενδιάμεσες βαθμίδες επιδρούν θετικά στην ευστάθεια, με αποτέλεσμα η ζώνη των πιθανών επιφανειών ολίσθησης να προκύπτει λιγότερο διευρυμένη.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

6.1 ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ackman, T. E. (2003). An introduction to the use of airborne technologies for watershed characterization in mined areas. *Mine Water and the Environment*, 22(2), 62–68. <https://doi.org/10.1007/s10230-003-0002-2>
- Aliabadi, M.M., Aghaei, H., Kalatpour, O., Soltanian, A.R., Seyedtabib, M., 2018. Effects of human and organizational deficiencies on workers' safety behavior at a mining site in Iran. 1–9. *Epidemiology and Health* Volume: 40, Article ID: e2018019, 9 pages Doi: 10.4178/epih.e2018019.
- Andrews, R. J., & Quintana, L. (2015). Unpredictable, unpreventable and impersonal medicine: global disaster response in the 21st century. *The Epma Journal*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s13167-014-0024-9>
- Antoniadis, P., Mavridou, E., Papazisimou, S., Christanis, K., Gentzis, T., 2006. Palaeoenvironmental conditions of the Mavropigi lignites, Ptolemais basin, Greece: a petrological study. *Energy Sources A28*, 311–327.
- Aschmann, H. (1973). Distribution and peculiarity of Mediterranean ecosystems. In Springer eBooks (pp. 11–19). https://doi.org/10.1007/978-3-642-65520-3_2
- Belczyk, E., & Smith, C. C. (2012). Geosynthetic landfill cap stability: comparison of limit equilibrium, computational limit analysis and finite-element analyses. *Geosynthetics International*, 19(2), 133–146. <https://doi.org/10.1680/gein.2012.19.2.133>
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5, No. 1, 7–17, doi: 10.1680/geot.1955.5.1.7.
- Bonsu, J. (2017). A systemic study of mining accident causality: an analysis of 91 mining accidents from a platinum mine in South Africa. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(1), 59–66. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n1a9>
- Brinkgreve, R. & Broere, Wout & Waterman, Dennis. (2004). *Plaxis 2D - Version 8*
- Bui, H. H., Fukagawa, R., Sako, K., & Wells, J. C. (2011b). Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH). *Geotechnique*, 61(7), 565–574. <https://doi.org/10.1680/geot.9.p.046>
- Burdon D. J. : “Hydrogeology of some karstic areas of Greece”, Proceedings Symposium. Hydrogeology of fractured rocks, 1965 Dubrovnik, A.I.H.S-UNESCO, Paris.
- Cai, F., & Ugai, K. (2003). Reinforcing mechanism of anchors in slopes: a numerical comparison of results of LEM and FEM. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 27(7), 549–564. <https://doi.org/10.1002/nag.284>
- Carlà, T., Tofani, V., Lombardi, L., Raspini, F., Bianchini, S., Bertolo, D., Thuegaz, P., & Casagli, N. (2019). Combination of GNSS, satellite InSAR, and GBInSAR remote sensing monitoring to improve the understanding of a large landslide in high alpine environment. *Geomorphology*, 335, 62–75. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.03.014>
- Chen, H., Liu, J., Long, R.Y., 2009. Effectiveness analysis of coal mine safety management institution based on behavior safety. *J. Liaoning Tech. Univ. (Nat.Sci.)* 28, 813–816.

- Chen, Y., Lin, H., Cao, R., & Zhang, C. (2021). Slope stability analysis considering different contributions of shear strength parameters. *International Journal of Geomechanics*, 21(3). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001937](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001937)
- Chen, Z., Qiao, G., & Zeng, J. (2019). Study on the Relationship between Worker States and Unsafe Behaviours in Coal Mine Accidents Based on a Bayesian Networks Model. *Sustainability*, 11(18), 5021. <https://doi.org/10.3390/su11185021>
- Cheuk, C., Ng, C. W. W., & Sun, H. (2005). Numerical experiments of soil nails in loose fill slopes subjected to rainfall infiltration effects. *Computers and Geotechnics*, 32(4), 290–303. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2005.02.005>
- Cho, C. H. (2009). Legitimation strategies used in response to environmental disaster: A French case study of Total SA's Erika and AZF incidents. *European Accounting Review*, 18(1), 33–62
- Cobley, A. (2020). Powering apartheid: The Coalbrook Mine disaster of 1960. *South African Historical Journal*, 72(1), 80–97. <https://doi.org/10.1080/02582473.2020.1728577>
- Coetzee, C. M., & Van Staden, C. J. (2011). Disclosure responses to mining accidents: South African evidence. *Accounting Forum*, 35(4), 232–246. <https://doi.org/10.1016/j.accfor.2011.06.001>
- Cordeiro, M.C., Garcia, G.D., Rocha, A.M., Tschoeke, D.A., Campeão, M.E., Appolinario, L.R., Soares, A.C., Leomil, L., Froes, A., Bahiense, L., Rezende, C.E., de Almeida, M.G., Rangel, T.P., De Oliveira, B.C.V., de Almeida, D.Q.R., Thompson, M. C., Thompson, C.C., Thompson, F.L., 2019. Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world's largest mining disaster.
- Corsini, A., Farina, P., Antonello, G., Barbieri, M., Casagli, N., Coren, F., Guerri, L., Ronchetti, F., Sterzai, P., & Tarchi, D. (2006). Space-borne and ground-based SAR interferometry as tools for landslide hazard management in civil protection. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2351–2369. <https://doi.org/10.1080/01431160600554405>
- Crosetto, M., Solari, L., Mróz, M., Balasis-Levinsen, J., Casagli, N., Frei, M., Oyen, A., Moldestad, D. A., Bateson, L., Guerrieri, L., Commerci, V., & Andersen, H. S. (2020). The evolution of Wide-Area DINSAR: from regional and national services to the European Ground Motion Service. *Remote Sensing*, 12(12), 2043. <https://doi.org/10.3390/rs12122043>
- Dawson, E., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999). Slope stability analysis by strength reduction. *Geotechnique*, 49(6), 835–840. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.6.835>
- Deegan, C., Rankin, M., & Voght, P. (2000). Firm's disclosure reactions to major social incidents: Australian evidence. *Accounting Forum*, 101–130.
- Dell, B., Havel, J. J., & Malajczuk, N. (1989). The Jarrah forest: a complex Mediterranean ecosystem. In Kluwer Academic Publishers eBooks. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA06665757>
- Diessel, C. F. K. (1992). Coal-Bearing depositional systems. In Springer eBooks. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-75668-9>
- Dimitrakopoulos D, Koumantakis I (2017) Hydrodynamic regime of Amynteon basin. Influence of open lignite mines. In: proceedings of the 11th international hydrogeological congress of Greece, Athens, vol. no 2, pp 101–112

- Duncan, J. M. (1996). State of the art: Limit Equilibrium and Finite-Element Analysis of slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(7), 577–596. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:7\(577](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:7(577)
- Düzgün, H.S., Leveson, N., 2018. Analysis of soma mine disaster using causal analysis based on systems theory(CAST). *Saf. Sci.* 110 (August), 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.07.028>.
- Engström, K. G., Angrén, J., Björnstig, U., & Saveman, B. (2017). Mass casualty incidents in the underground mining industry: Applying the Haddon Matrix on an Integrative literature review. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 12(1), 138–146. <https://doi.org/10.1017/dmp.2017.31>
- Faheem, H., Cai, F., Ugai, K., & Hagiwara, T. (2003). Two-dimensional base stability of excavations in soft soils using FEM. *Computers and Geotechnics*, 30(2), 141–163. [https://doi.org/10.1016/s0266-352x\(02\)00061-7](https://doi.org/10.1016/s0266-352x(02)00061-7)
- Fairhurst, C., & Pei, J. (1990). A comparison between the distinct element method and the finite element method for analysis of the stability of an excavation in jointed rock. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 5(1–2), 111–117. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(90\)90066-s](https://doi.org/10.1016/0886-7798(90)90066-s)
- Fellenius, W. (1936). Calculation of the stability of earth dams. *Proc. 2nd Congr. Large Dams*, Washington, DC 4, 445–462.
- Foumelis, M., Blasco, J. M. D., Brito, F., Pacini, F., Papageorgiou, E., Pishehvar, P., & Bally, P. (2022b). SNAPPING services on the geohazards exploitation platform for Copernicus Sentinel-1 surface motion mapping. *Remote Sensing*, 14(23), 6075. <https://doi.org/10.3390/rs14236075>
- Frank, I. C. (2002). Miracle of the miners: The Quecreek rescue from an ED perspective. *Journal of Emergency Nursing*, 28(6), 544–548. <https://doi.org/10.1067/men.2002.129927>
- Gasith, A., & Resh, V. H. (1999b). Streams in Mediterranean climate regions: Abiotic influences and biotic responses to predictable seasonal events. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30(1), 51–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.30.1.51>
- Ge, M. C., Wang, H., Hardy, H. R., & Ramani, R. (2008). Void detection at an anthracite mine using an in-seam seismic method. *International Journal of Coal Geology*, 73(3–4), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2007.05.004>
- Gochioco, L. M., (2003). "Geophysical technologies for detecting underground coal mine voids—An interactive forum," *The Leading Edge* 22: 848-920.
- Gochioco, L. M., Miller, T., & Ruev, F. (2008). High-resolution 2D surface seismic reflection survey to detect abandoned old coal mine works to improve mine safety. *The Leading Edge*, 27(1), 80–86. <https://doi.org/10.1190/1.2831684>
- Gold O.: "Report on Megalopolis", Volume I-III, VII-VIII, 1961-63.
- Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (2001). Slope stability analysis by finite elements. *Geotechnique*, 51(7), 653–654. <https://doi.org/10.1680/geot.51.7.653.51390>
- Griffiths, D. V., Huang, J., & Fenton, G. A. (2009). Influence of spatial variability on slope reliability using 2-D random fields. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(10), 1367–1378. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000099](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000099)

- Groves, W. A., Kecojevic, V., & Komljenovic, D. (2007). Analysis of fatalities and injuries involving mining equipment. *Journal of Safety Research*, 38(4), 461–470. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.03.011>
- Gui, F., Zhao, Z., Hao, C., & Wu, Q. (2019). The accident path of coal mine gas explosion based on 24Model: A case study of the Ruizhiyuan gas explosion accident. *Processes*, 7(2), 73. <https://doi.org/10.3390/pr7020073>
- Guo, S., Zhou, X., Tang, B., Gong, P., 2020. Exploring the behavioral risk chains of accidents using complex network theory in the construction industry. *Physica A* 560, 125012. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125012>.
- Haldar, S. (2018). Environmental system management of mineral resources and sustainable development. In Elsevier eBooks (pp. 291–311). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814022-2.00014-9>
- Hammouri, N., Malkawi, A. I. H., & Yamin, M. M. (2008). Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67(4), 471–478. <https://doi.org/10.1007/s10064-008-0156-z>
- Harrison, R. M., & Jones, M. (1995). The chemical composition of airborne particles in the UK atmosphere. *Science of the Total Environment*, 168(3), 195–214. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04536-a](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04536-a)
- Hauselmann, Ph., Jeannin, PY. & Bitterli, T. (1999). Relationships between karst and tectonics: case-study of the cave system north of Lake Thun (Bern, Switzerland), *Geodin Acta* 12, numéro 6:377–387.
- Havivi, S., Rotman, S. R., Blumberg, D. G., & Maman, S. (2022). Damage assessment in rural environments following natural disasters using Multi-Sensor Remote Sensing data. *Sensors*, 22(24), 9998. <https://doi.org/10.3390/s22249998>
- He, M., Cheng, T. H., Qiao, Y., & Li, H. (2023). A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(5), 1312–1353. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.07.014>
- Herak, M. & Stringfield, V. T. (1972). *Karst, important karst regions of the northern hemisphere*, Elsevier, New York, 552 p.
- Hiltermann, H. und Lüttig, G., 1969. Biofazies und Paläolimnologie der pliozänen und pleistozänen Seen im Megalopolis-Becken (Peloponnes). *Mitt. Internat. Verein. Limnol.*, 17: 306-314.
- Houérou, H. N. L. (2013). GLOBAL CHANGE: VEGETATION, ECOSYSTEMS, AND LAND USE IN THE SOUTHERN MEDITERRANEAN BASIN BY THE MID TWENTY-FIRST CENTURY. *Israel Journal of Botany*, 39, 481–508. <https://doi.org/10.1080/0021213x.1990.10677170>
- Hu, Y., & McMechan, G. A. (2007). Imaging mining hazards within coalbeds using prestack wave equation migration of in-seam seismic survey data: A feasibility study with synthetic data. *Journal of Applied Geophysics*, 63(1), 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2007.03.002>
- Huber, D., & Vandapel, N. (2006). Automatic 3D underground mine mapping. In Springer eBooks (pp. 497–506). https://doi.org/10.1007/10991459_48

- Iannini, L., & Guarnieri, A. M. (2011). Atmospheric Phase Screen in Ground-Based Radar: Statistics and compensation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3), 537–541. <https://doi.org/10.1109/lgrs.2010.2090647>
- Janbu, N. (1968). Slope stability computation, *Soil Mechanics and Foundation Engineering Report*. Trondheim: Technical University of Norway.
- Jennings, J. N. (1985). *Karst geomorphology*, Basil Blackwell Inc, New York, 293p.
- Jevtić, R. (2020). Simulation of evacuation from mine as a safety measurement. *Tehnika*. <https://doi.org/10.5937/tehnika2001110j>
- Jiang, W., Zhu, Z.M., Xiang, Y.C., 2017. Study on the unsafe acts and education function in coal mine accidents caused by rescue. 8223(11), 6203–6209. *EURASIA J. Math. Sci. Technol. Education* ISSN: 1305-8223 (online) 1305-8215 (print) 2017 13(9): 6203-6209 DOI: 10.12973/eurasia.2017.01059a.
- Johnson, W. J. (2003). Case histories of dc resistivity measurements to map shallow coal mine workings. *The Leading Edge*, 22(6), 571–573. <https://doi.org/10.1190/1.1587681>
- Junginger, S. (2012). The Chile Miner Rescue: a human-centred design reflection. *Design Journal*, 15(2), 169–183. <https://doi.org/10.2752/175630612x13258652805059>
- Kalaitzidis, S., Papazisimou, S., Bouzinos, A., Christanis, K., 2004. A short-term establishment of forest fen habitat during Pliocene lignite formation in the Ptolemais Basin, NW Macedonia Greece. *Int. J. Coal Geol.* 57, 243–263.
- Katou, M., Matsuoka, T., Yoshioka, O., Yukiotoshi, S., & Miyoshi, T. (2008). Numerical simulation study of ground vibrations using forces from wheels of a running high-speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 318(4–5), 830–849. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.04.053>
- Kim, S., Lee, J., Kang, C., 2021. Analysis of industrial accidents causing through jamming or crushing accidental deaths in the manufacturing industry in South Korea: Focus on non-routine work on machinery. *Saf. Sci.*, 133(September 2020), 104998. Doi: 10.1016/j.ssci.2020.104998.
- Kong, D., Liu, S., Xiang, J., 2018. *China Economic Review* Political promotion and labor investment efficiency, 273–293. Doi: 10.1016/j.chieco.2018.05.002.
- Lee, J.Y., Chung, J.H., Son, B., 2008. Analysis of traffic accident size for Korean highway using structural equation models. *Accid. Anal. Prev.* 40, 1955–1963.
- Lenné, M.G., Salmon, P.M., Liu, C.C., et al., 2012. A systems approach to accident causation in mining: an application of the HFACS method. *Accid. Anal. Prev.* 48,111–117.
- Li, H.J., Liu, T.Z., Li, Z.X., 2010. Study on theory framework of safety management capability in coal mine. *J. Saf. Sci. Tech.* 16, 143–148.
- Li, Y., Wu, X., Luo, X., Gao, J., Yin, W., 2019. Impact of safety attitude on the safety behavior of coal miners in China. *Sustainability (Switzerland)* 11 (22), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su11226382>.
- Liu, Q., Li, X., & Hassall, M. (2015). Evolutionary game analysis and stability control scenarios of coal mine safety inspection system in China based on system dynamics. *Safety Science*, 80, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.005>
- Liu, T.Z., Li, Z.X., 2008. Affecting factors of safety management capability about coalmine based on structural equation model. *J. China Coal Soc.* 33, 1452–1456.

- Lönhert, E. und Nowak, H., 1965. Die Braunkohlenlagerstätte von Khoremi im Becken von Megalopolis/Peloponnes. *Geol. Jb.*, 82: 847-868.
- Loupasakis, C. (2020). Contradictive mining-induced geocatastrophic events at open pit coal mines: the case of Amintaio coal mine, West Macedonia, Greece. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(13). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05633-y>
- Lu, X. B., He, C. J. D. G. X. & Bao, D. (2014). Development features of karst ancient river system in Ordovician reservoirs, Tahe Oil Field, *Pet. Geol. Exp.*, 36(3):268–274.
- Lulla, K. (2006). Mediterranean climate. In Kluwer Academic Publishers eBooks (pp. 569–571). https://doi.org/10.1007/0-387-30749-4_113
- Lüttig, G. and Marinos, G., 1962. Zur Geologie der neuen Griechischen Braunkohlen Lagerstätte von Megalopolis. *Braunk. Wärm. Energ.*, 14: 222-231.
- Lv, J., Li, X., Li, Z., & Fu, H. (2019). Numerical Simulations of Construction of Shield Tunnel with Small Clearance to Adjacent Tunnel without and with Isolation Pile Reinforcement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(1), 295–309. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1167-y>
- Lyra, M.G., 2019. The extractive industries and society challenging extractivism: activism over the aftermath of the fundão disaster. *The Extractive Ind. Soc.* 6 (3), 897–905. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.05.010>.
- Martin, C. D., & Maybee, W. G. (2000). The strength of hard-rock pillars. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(8), 1239–1246. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(00\)00032-0](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(00)00032-0)
- Matsui, T., & San, K. (1992c). Finite element slope Stability Analysis by Shear Strength Reduction Technique. *Soils and Foundations*, 32(1), 59–70. <https://doi.org/10.3208/sandf1972.32.59>
- Modeste, G., Doubre, C., & Masson, F. (2021). Time evolution of mining-related residual subsidence monitored over a 24-year period using InSAR in southern Alsace, France. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102392. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102392>
- Morgenstern, N. R. & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique* 15, No. 1, 79–93, doi: 10.1680/geot.1965.15.1.79.
- Morris, A., Ferguson, D., Omohundro, Z., Bradley, D. M., Silver, D., Baker, C., Thayer, S., Whittaker, C., & Whittaker, W. (2006). Recent developments in subterranean robotics. *Journal of Field Robotics*, 23(1), 35–57. <https://doi.org/10.1002/rob.20106>
- Murphy, R. R., Kravitz, J., Stover, S., & Shoureshi, R. (2009). Mobile robots in mine rescue and recovery. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 16(2), 91–103. <https://doi.org/10.1109/mra.2009.932521>
- Nahal, I. (1981). Mediterranean climate from a biological viewpoint. *Ecosystems of the World*.
- Nickel, B., Riegel, W., Schönherr, T., & Velitzelos, E. (1996). Environments of coal formation in the Pleistocene lignite at Megalopolis, Peloponnesus (Greece) - reconstructions from palynological and petrological investigations. *Neues Jahrbuch Für Geologie Und Paläontologie*, 200(1–2), 201–220. <https://doi.org/10.1127/njgpa/200/1996/201>

- Oblozinsky, P., Ugai, K., Katagiri, M., Saitoh, K., Ishii, T., Masuda, T., & Kuwabara, K. (2001). A design method for slurry trench wall stability in sandy ground based on the elasto-plastic FEM. *Computers and Geotechnics*, 28(2), 145–159. [https://doi.org/10.1016/s0266-352x\(00\)00028-8](https://doi.org/10.1016/s0266-352x(00)00028-8)
- Okuda, M., Van Vugt, N., Nakagawa, T., Ikeya, M., Hayashida, A., Yasuda, Y., & Setoguchi, T. (2002). Palynological evidence for the astronomical origin of lignite–detritus sequence in the Middle Pleistocene Marathousa Member, Megalopolis, SW Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 201(1), 143–157. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00706-9](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00706-9)
- Owen, D.R.J., Feng, Y.T., Neto, E.A.D., Cottrell, M.G., Wang, F., Pires, F.M.A., Yu, J., 2004. The modelling of multi-fracturing solids and particulate media. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 60 (1), 317e339.
- Pacheco, J., De Brito, J., Chastre, C., & Evangelista, L. (2019). Probabilistic conversion of the compressive strength of cubes to cylinders of natural and recycled aggregate concrete specimens. *Materials*, 12(2), 280. <https://doi.org/10.3390/ma12020280>
- Page, K., 2009. Blood on the coal: the effect of organizational size and differentiation on coal mine accidents. *J. Saf. Res.* 40, 85–95.
- Papanicolaou, C., Kotis, T., Foscolos, A., Goodarzi, F., 2004. Coals of Greece: a review of properties, uses and future perspectives. *Int. J. Coal Geol.* 58, 147–169.
- Pasternack, S., & Shi-Hang, G. (1988). Numerical methods in the stability analysis of slopes. *Computers & Structures*, 30(3), 573–579. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(88\)90291-x](https://doi.org/10.1016/0045-7949(88)90291-x)
- Patterson, J.M., Shappell, S.A., 2010. Operator error and system deficiencies: analysis of 508 mining incidents and accidents from Queensland, Australia using HFACS. *Accid. Anal. Prev.* 42, 1379–1385.
- Paul, P.S., Maiti, J., 2007. The role of behavioral factors on safety management in underground mines. *Saf. Sci.* 45, 449–471.
- Pieraccini, M., & Miccinesi, L. (2019). Ground-Based Radar Interferometry: A bibliographic review. *Remote Sensing*, 11(9), 1029. <https://doi.org/10.3390/rs11091029>
- Potts, D. M., Dounias, G. T., & Vaughan, P. R. (1990). Finite element analysis of progressive failure of Carsington embankment. *Geotechnique*, 40(1), 79–101. <https://doi.org/10.1680/geot.1990.40.1.79>
- Poulsen, B., Shen, B., Williams, D. J., Huddleston-Holmes, C., Erarslan, N., & Qin, J. (2014). Strength reduction on saturation of coal and coal measures rocks with implications for coal pillar strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.06.012>
- Qiao, W., Li, X., & Liu, Q. (2019). Systemic approaches to incident analysis in coal mines: Comparison of the STAMP, FRAM and “2–4” models. *Resources Policy*, 63, 101453. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101453>
- Ren, J., Jenkinson, I., Wang, J., et al., 2008. A methodology to model causal relationships on offshore safety assessment focusing on human and organizational factors. *J. Saf. Res.* 39, 87–100.
- Renani, H. R., & Martin, C. D. (2018). Modeling the progressive failure of hard rock pillars. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 74, 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.01.006>

- Romero, H., Méndez, M., & Smith, P. (2012). Mining development and environmental injustice in the Atacama desert of northern Chile. *Environmental Justice*, 5(2), 70–76. <https://doi.org/10.1089/env.2011.0017>
- Rouni, P., Petropoulos, N., Anagnostakis, M., Hinis, E., & Simopoulos, S. (2001). Radioenvironmental survey of the Megalopolis lignite field basin. *Science of the Total Environment*, 272(1–3), 261–272. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(01\)00703-3](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(01)00703-3)
- Sakorafa, V., & Michailidis, K. (1997). The geology and coal petrology of a Pleistocene lignite profile at Horemi mine, Megalopolis Basin, Peloponnese (southern Greece). *International Journal of Coal Geology*, 33(1), 73–91. [https://doi.org/10.1016/s0166-5162\(96\)00002-x](https://doi.org/10.1016/s0166-5162(96)00002-x)
- Salamon MDG, Munro AH. (1967). A study of the strength of coal pillars.
- Saleh, J. H., & Cummings, A. M. (2011b). Safety in the mining industry and the unfinished legacy of mining accidents: Safety levers and defense-in-depth for addressing mining hazards. *Safety Science*, 49(6), 764–777. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2011.02.017>
- Selway, D. (2016). Death Underground: Mining Accidents and memory in South Wales, 1913–74. *Labour History Review*, 81(3), 187–209. <https://doi.org/10.3828/lhr.2016.10>
- Shao, L., 2019. Geological disaster prevention and control and resource protection in mineral resource exploitation region. February, 142–146. Doi: 10.1093/ijlct/ctz003. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 2019, 14, 142–146. doi:10.1093/ijlct/ctz003. *Hindawi Advances in Civil Engineering* Volume 2019, Article ID 1269537, 10 pages Doi: 10.1155/2019/1269537.
- Siavalas, G., Linou, M., Chatziapostolou, A., Kalaitzidis, S., Papaefthymiou, H., & Christanis, K. (2009). PalaeoEnvironment of Seam I in the Marathousa Lignite Mine, Megalopolis Basin (Southern Greece). *International Journal of Coal Geology*, 78(4), 233–248. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.03.003>
- Sloan, S. W. (1982). Numerical analysis of incompressible and plastic solids using finite elements. <https://doi.org/10.17863/cam.31169>
- Sloan, S. W. (2013b). Geotechnical stability analysis. *Geotechnique*, 63(7), 531–571. <https://doi.org/10.1680/geot.12.rl.001>
- Sloan, S. W., & Randolph, M. (1982). Numerical prediction of collapse loads using finite element methods. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 6(1), 47–76. <https://doi.org/10.1002/nag.1610060105>
- Society for Mining, Metallurgy and Exploration (S.M.E.), 2011. *Mining Engineering Handbook*. 3rd ed. U.S.A.: Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces. *Geotechnique* 17, No. 1, 11–26, doi: 10.1680/geot.1967.17.1.11.
- Sun, C., Jaturapitakkul, C., Luo, T., Xu, Z., Chen, X., Qin, Y., & Ma, B. (2021). Nonlinear Shear-Strength Reduction Technique for Stability Analysis of Uniform Cohesive Slopes with a General Nonlinear Failure Criterion. *International Journal of Geomechanics*, 21(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001885](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001885)
- Tapia C. Choreographed care at Quecreek Mine rescue. *JEMS*. 2002; 27(10):130.

- Thrun, S., Hähnel, D., Ferguson, D., Montemerlo, M., Triebel, R., Burgard, W., Baker, C., Omohundro, Z., Thayer, S., & Whittaker, W. (2004). A system for volumetric robotic mapping of abandoned mines. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No.03CH37422), Taipei, Taiwan, 2003, 3, 4270–4275. <https://doi.org/10.1109/robot.2003.1242260>
- Underwood, P., Waterson, P., 2014. Systems thinking, the Swiss Cheese Model and accident analysis: a comparative systemic analysis of the Gray rigg train derailment using the ATSB, AcciMap and STAMP models. *Accid. Anal. Prev.* 68,75–94.
- United States. Department of Labor. Mine Safety & Health Administration (MSHA), (1990). “Accident Investigation”.
- United States. Department of Labor. Mine Safety & Health Administration (MSHA), (2002).
- Van Der Merwe, J., & Mathey, M. (2013). Update of coal pillar database for South African coal mining. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(11), 825–840.
- Vassilakis, E., Foumelis, M., Erkeki, A., Kotsi, E., & Lekkas, E. (2020). Post-event surface deformation of Amyntaio slide (Greece) by complementary analysis of Remotely Piloted Airborne System imagery and SAR interferometry. *Applied Geomatics*, 13(S1), 65–75. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00347-y>
- Vinken, R., 1965. Stratigraphie und Tektonik des Beckens von Megalopolis (Peloponnes, Griechenland). *Geol. Jb.* 83, 97–148.
- Wang, D., Zentar, R., Abriak, N., & Di, S. (2017). Long-term mechanical performance of marine sediments solidified with cement, lime, and fly ash. *Marine Georesources & Geotechnology*, 36(1), 123–130. <https://doi.org/10.1080/1064119x.2017.1320600>
- Wang, Q., Wang, H., & Qi, Z. (2016). An application of nonlinear fuzzy analytic hierarchy process in safety evaluation of coal mine. *Safety Science*, 86, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.02.012>
- Xi, J., Cliff, D., & Zong-Zhi, W. (2017). A comparison of underground coal mine emergency management in China and Australia. *International Journal of Emergency Management*, 13(4), 349. <https://doi.org/10.1504/ijem.2017.087227>
- Xiang, C., Zhou, E., Hong, R., Liu, H., & Xu, X. (2019). Brittleness Risk Evaluation of mine safety based on brittle relational entropy. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2019/1412897>
- Xiao, W., Xu, J., Lv, X., 2019. Establishing a georeferenced spatio-temporal database for Chinese coal mining accidents between 2000 and 2015. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 10 (1), 242–270. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1521476>.
- Xiao-Liang, L., Chen, X., Su, M., Shi-Lin, Z., & Lu, D. (2021). Stability analysis of a Weathered-Basalt soil slope using the double strength reduction method. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/6640698>
- Yang, B., & Yuan, J. (2019). Influence of soda content on desiccation cracks in clayey soils. *Soil Science Society of America Journal*, 83(4), 1054–1061. <https://doi.org/10.2136/sssaj2018.05.0204>
- Yuan, B., Li, Z., Su, Z., Luo, Q., Chen, M., & Zhao, Z. (2021a). Sensitivity of multistage fill slope based on finite element model. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2021/6622936>

- Yuan, B., Sun, M., Xiong, L., Luo, Q., Pradhan, S. P., & Li, H. (2020). Investigation of 3D deformation of transparent soil around a laterally loaded pile based on a hydraulic gradient model test. *Journal of Building Engineering*, 28, 101024. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101024>
- Zeng, G., Qiao, H., Gao-Wei, J., & De-Po, L. (2009). Research on equipments arrangement in rescuing operations of coal mine inundation. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1(1), 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2009.09.043>
- Zhang, Y., Shao, W., Zhang, M., Li, H., Yin, S., Xu, Y., 2016b. Analysis 320 coal mine accidents using structural equation modeling with unsafe conditions of the rules and regulations as exogenous variables. *Accid. Anal. Prev.* 92, 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.02.021>.
- Zheng, H., Liu, D. F., & Li, C. G. (2005a). Slope stability analysis based on elasto-plastic finite element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 64(14), 1871–1888. <https://doi.org/10.1002/nme.1406>
- Zhu, Y. G., Zhang, S. C., Wang, H. H., Yang, H. J., Meng, S. C., Gu, Q. Y., Zhang, B. & Su, J. (2009). The formation and distribution of deep weathering crust in north Tarim basin, *Acta petrol. sin* 25(10):2348–2398.
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., & Lewis, R. W. (1975). Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 25(4), 671–689. <https://doi.org/10.1680/geot.1975.25.4.671>

6.2 ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασίου, Α., Καλλέργης, Γ. και Καπερώνης, Ν., 1972. Γεωλογική και κοιτασματολογική έρευνα λιγνιτικού κοιτάσματος πεδίου Μαραθούσης (Μεγαλοπόλεως). Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας IX (2): 1-36.
- Δημητρακοπούλου, Σ. (2011). Διερεύνηση δυνατότητας δημιουργίας λιμνών στις περιοχές των ορυχείων Μεγαλόπολης κατά τη μεταλιγνιτική περίοδο. Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μεταλλειολόγων-Μεταλλουργών Μηχανικών
- Δημητρούκας Ν. « Εξέλιξη υδροδυναμικού καθεστώτος υπογείων νερών λιγνιτικού πεδίου Κυπαρισσίων Μεγαλόπολης, υπό συνθήκες υπεραντλήσεων 40 ετών», Μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ 2003.
- Ευελπίδου, Ν. (2018). Γεωμορφολογία Εργαστηριακές Ασκήσεις, Ακαδημαϊκές Εκδόσεις
- Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), 1997. Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδος (1:50.000), Φύλλο Μεγαλόπολης.
- INTERGEO: «Διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών και της ποιότητας κατάστασης των υπόγειων και επιφανειακών νερών στο χώρο απόθεσης της τέφρας και των προϊόντων αποθείωσης, στο ορυχείο Θωκνίας» Μελέτη για τη ΔΕΗ, Θεσ/νίκη 2000.
- Καπερώνης, Ν., Αθανασίου, Α. και Αγγελούπουλου, Γ., 1974. Γεωλογική και κοιτασματολογική έρευνα πεδίου «Μαραθούσα-Βόρειον Χωρέμι» λιγνιτοφόρου λεκάνης Μεγαλοπόλεως. Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού, Διεύθυνση Ορυχείων, Αθήνα: 139 σελ.

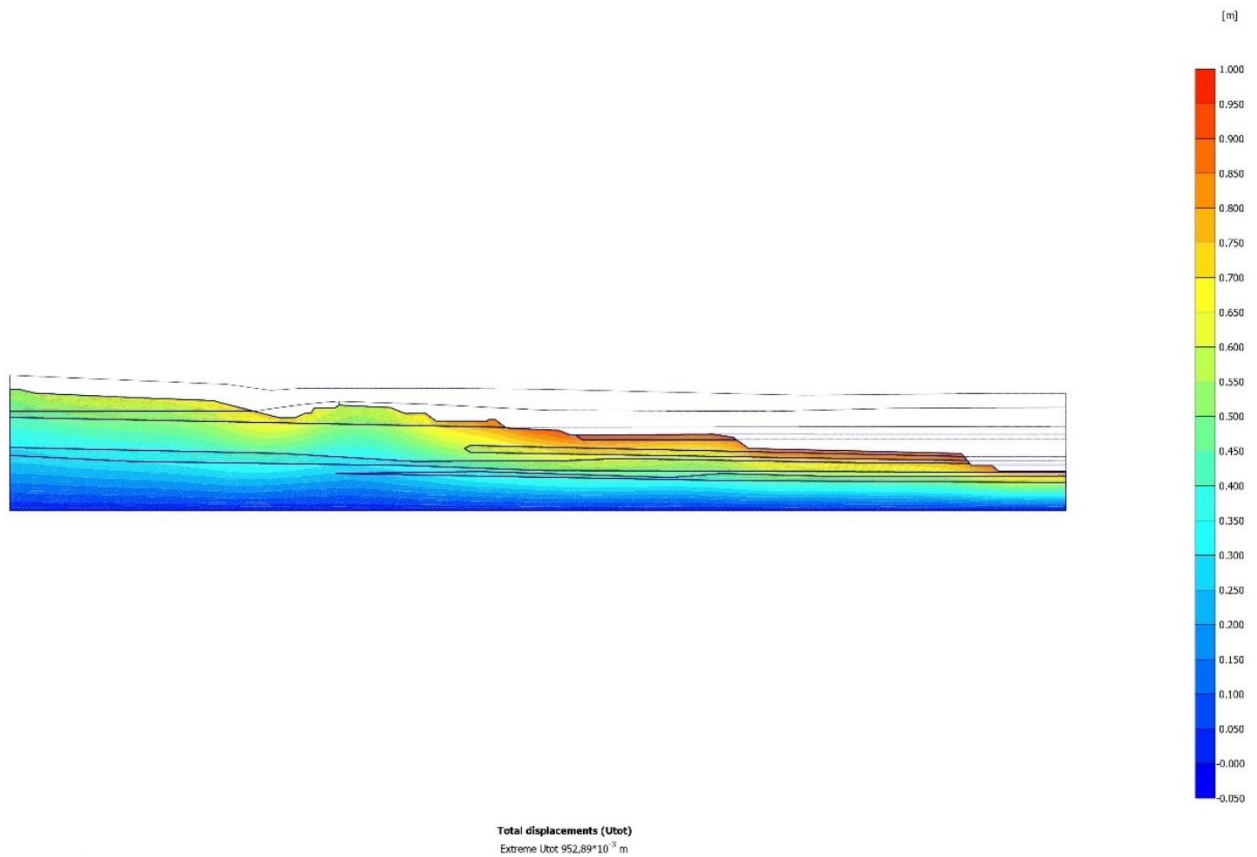
- Μαρίνος, Γ., Αναστόπουλος, Ι. και Παπανικολάου, Ν., 1959. Η λιγνιτοφόρος λεκάνη Μεγαλοπόλεως. Πρόδρομος μελέτη, Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, 3: 1-51.
- Μαριολάκος, Η., 1976. Σκέψεις και απόψεις επί ορισμένων προβλημάτων της γεωλογικής και τεκτονικής δομής της Πελοποννήσου. Διατριβή επί Υψηγεία. Παν/μιο Αθηνών
- Νικολάου Ν, Κυνηγαλάκη Μ, Κανάρης Δ, 2008, Τεχνικογεωλογική αναγνώριση στο Δ.Δ. Χωρεμίου, Δήμου Μεγαλόπολης, Νομού Αρκαδίας. Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αθήνα
- Τσιφτσής Ε.: Γεωτεκτονικός – Υδρογεωλογικός χάρτης Δημητσάνας – Μεγαλόπολης, 1:25.000, έκδοση ΙΓΜΕ, 1986.

6.3 ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

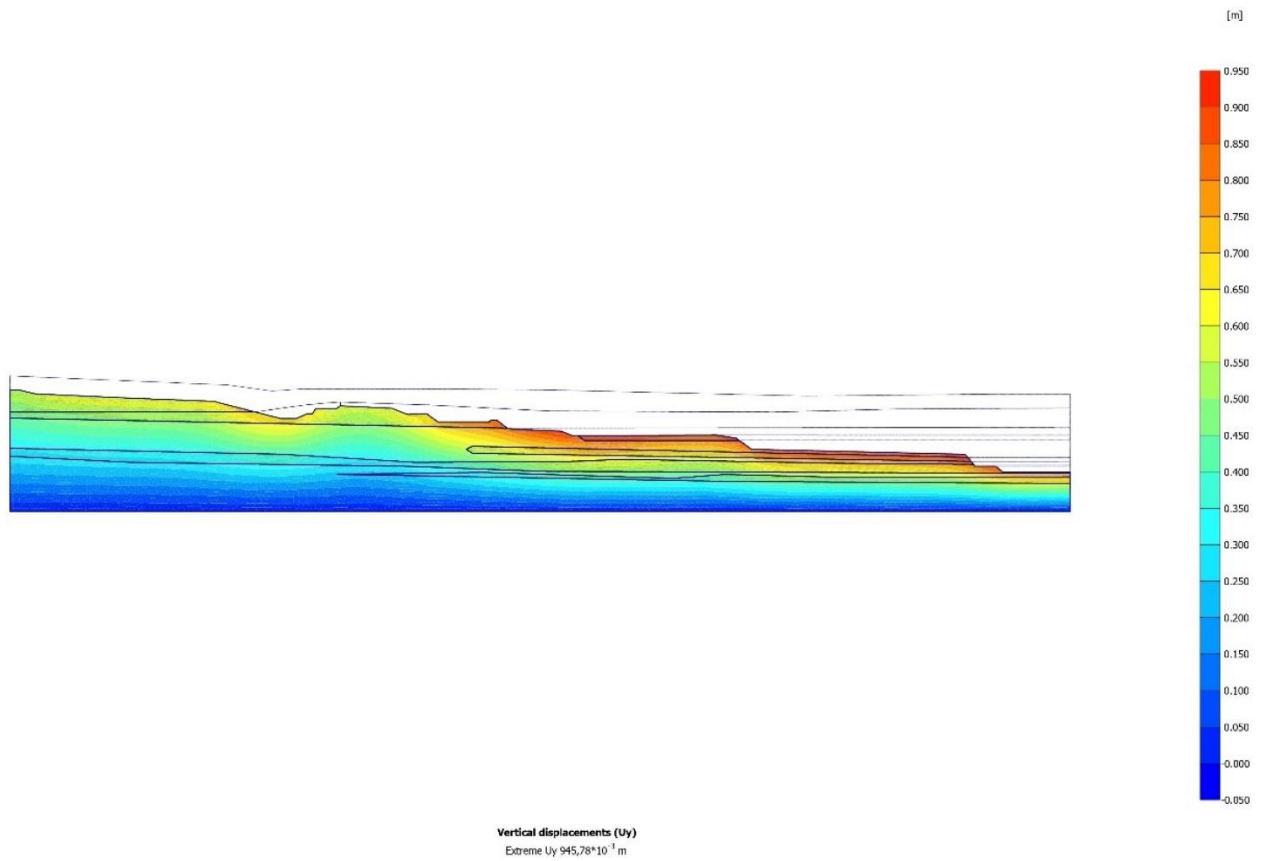
- BBC News, 2010 - <https://www.bbc.com/news/world-latin-america-11102478>
Ημερομηνία τελευταίας πρόσβασης: 06/02/2024
- The Quecreek Mine Rescue Foundation - <https://www.quecreekrescue.org/photos.php>
Ημερομηνία τελευταίας πρόσβασης: 06/02/2024
- Twin Cities: Pioneer Press, 2010 - <https://www.twincities.com/2010/10/11/miners-underground-nightmare-almost-over/>
Ημερομηνία τελευταίας πρόσβασης: 06/02/2024
- IDS GeoRadar-Hexagon, 2024 - <https://idsgeoradar.com/products/interferometric-radar>
Ημερομηνία τελευταίας πρόσβασης: 06/02/2024

7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

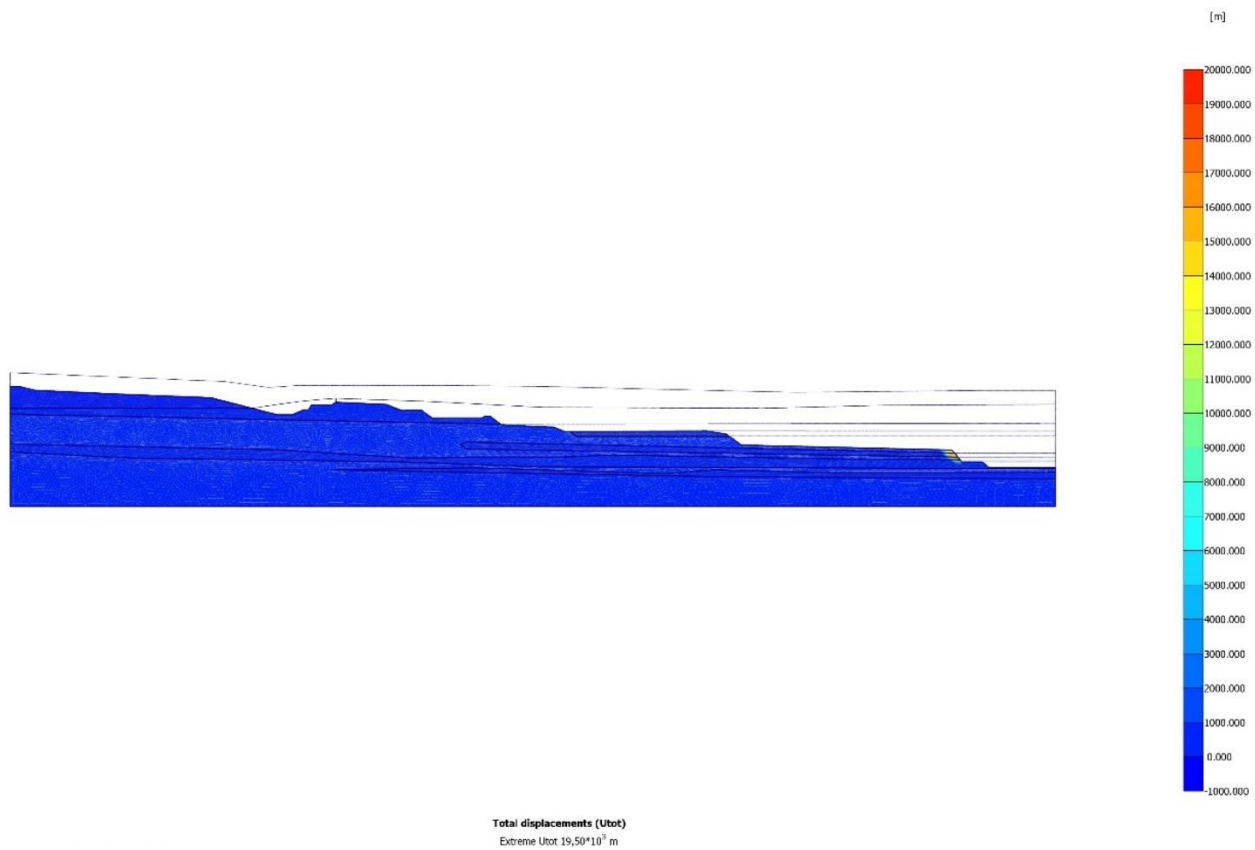
7.1 1^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



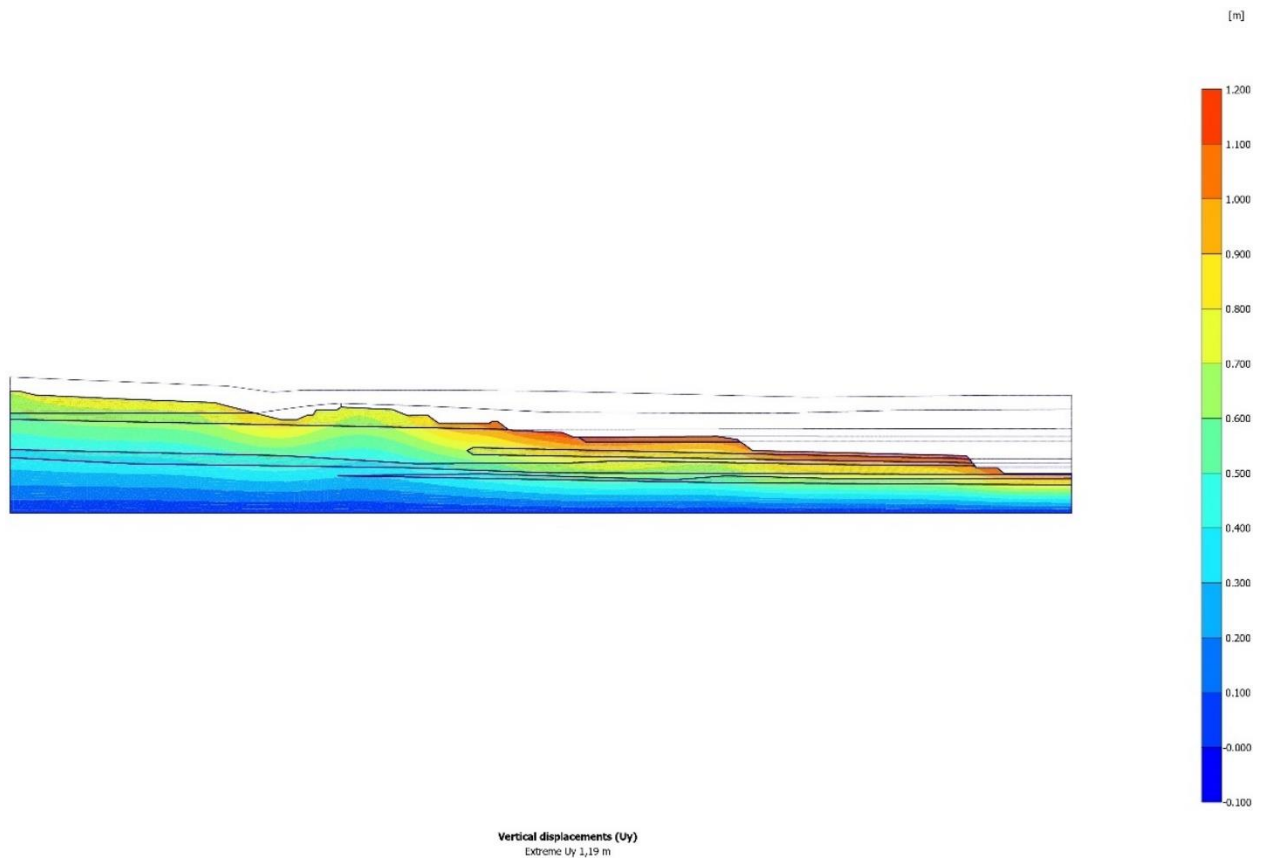
Εικόνα 54. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



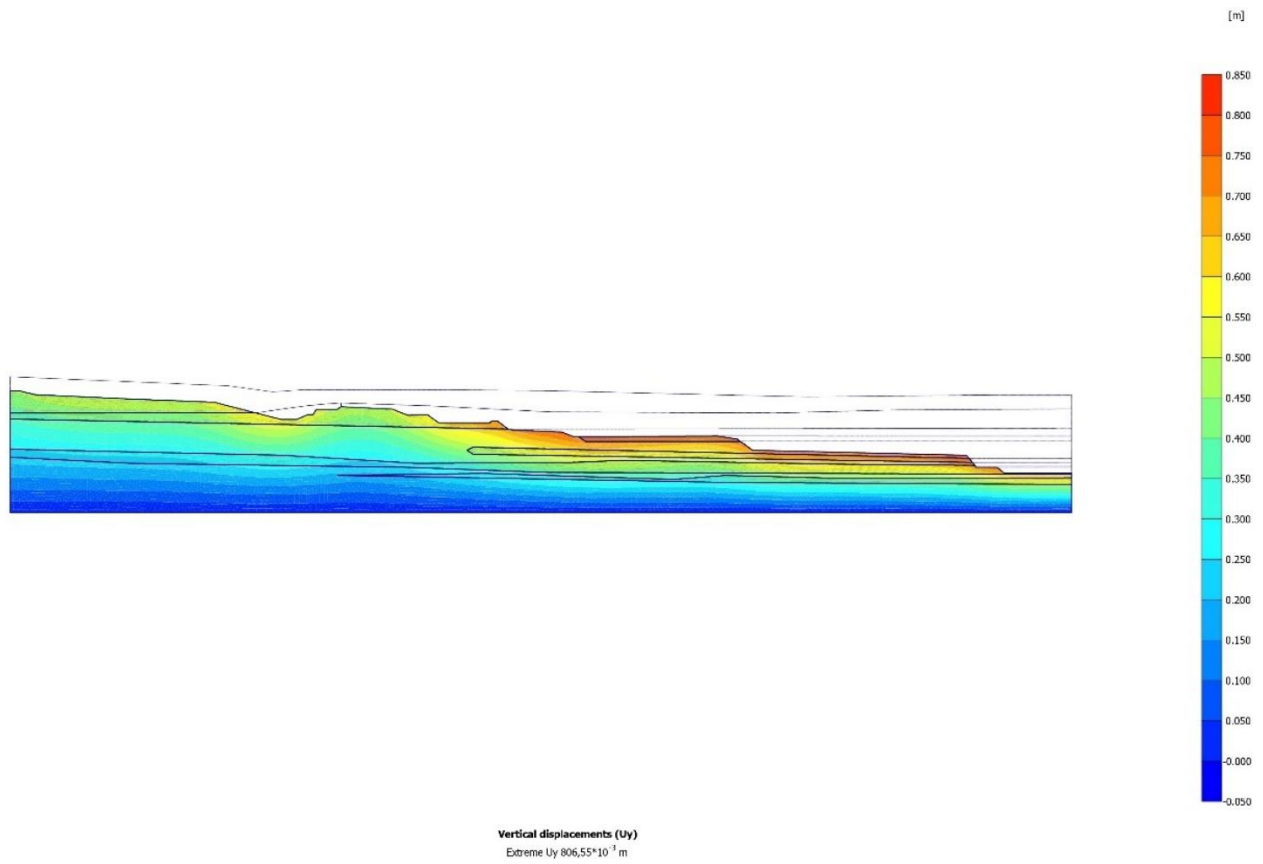
Εικόνα 55. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



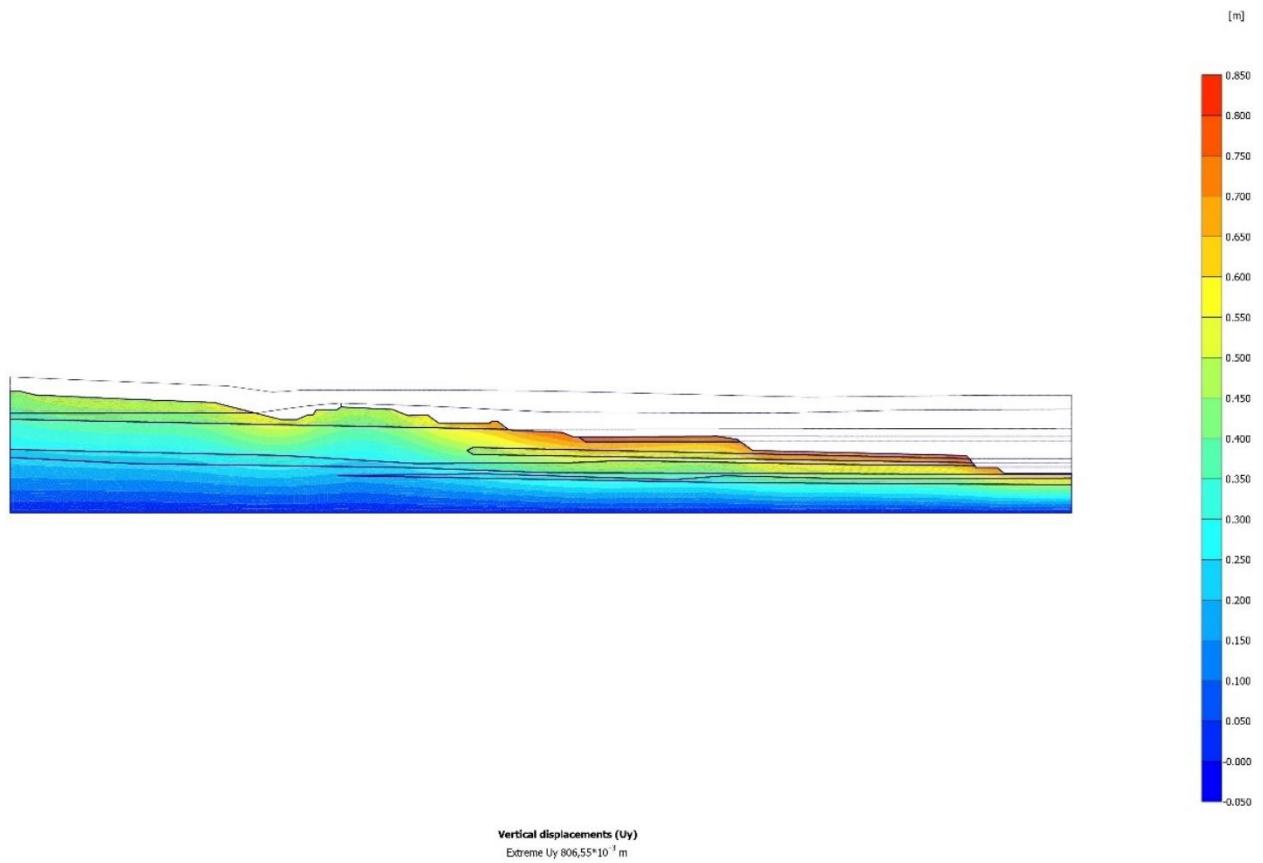
Εικόνα 56. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



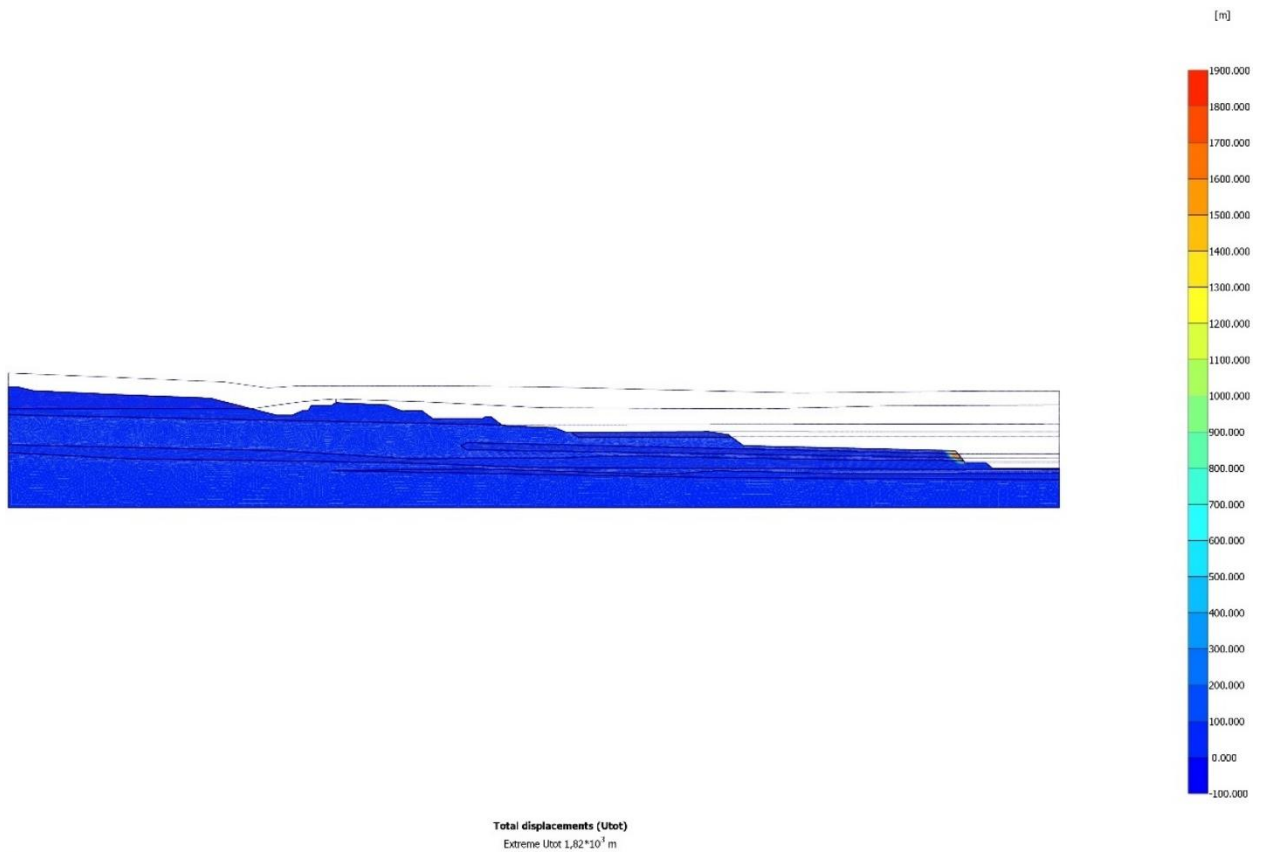
Εικόνα 57. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



Εικόνα 58. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

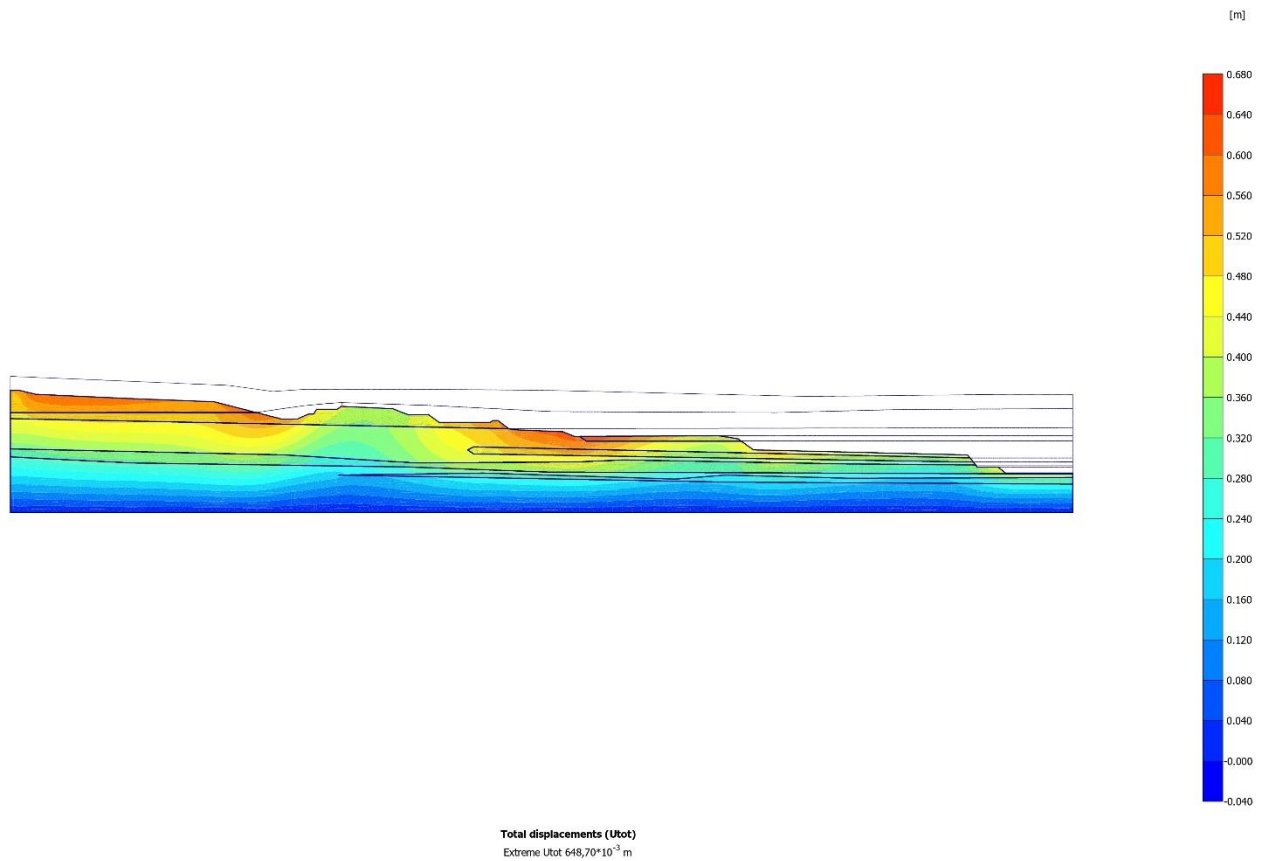


Εικόνα 59. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

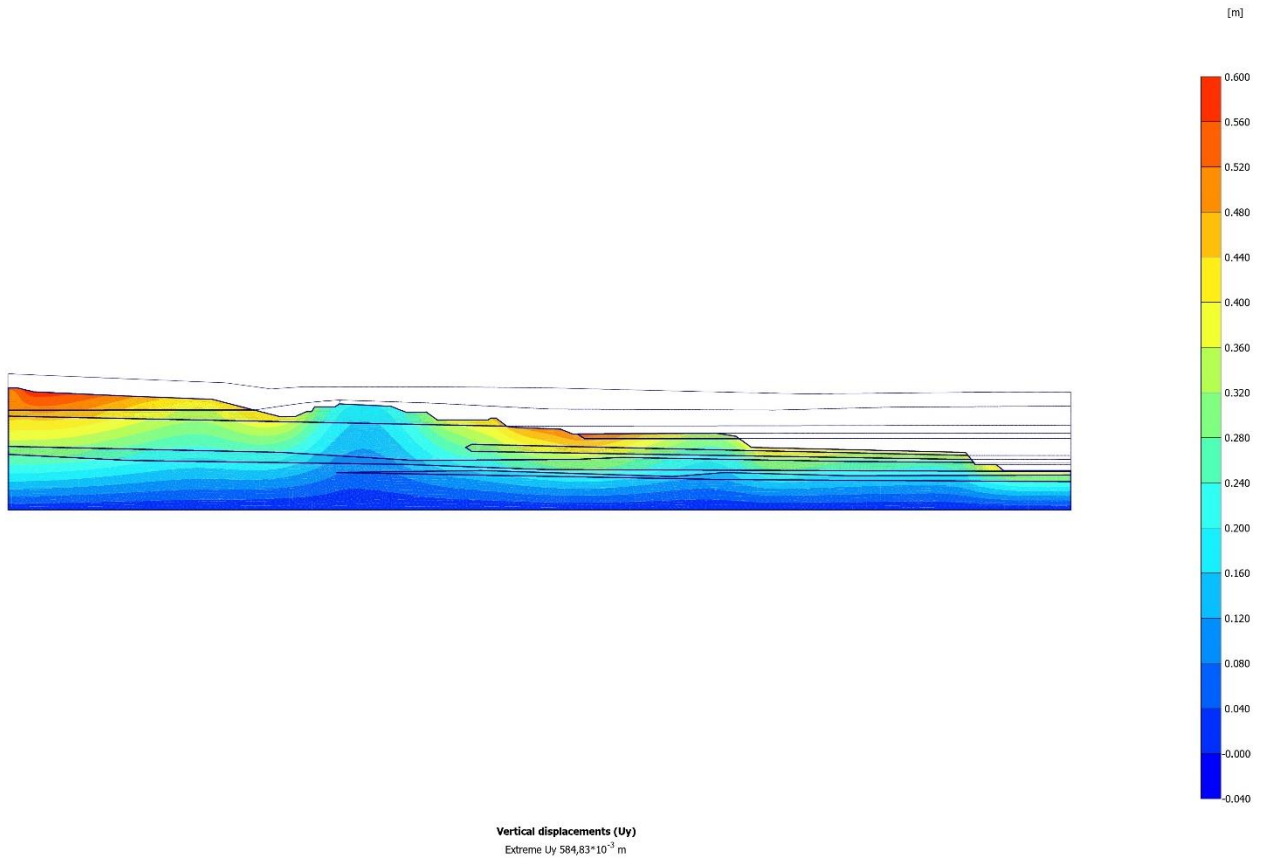


Εικόνα 60. Δυναμικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής, απουσία υδροφόρου ορίζοντα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

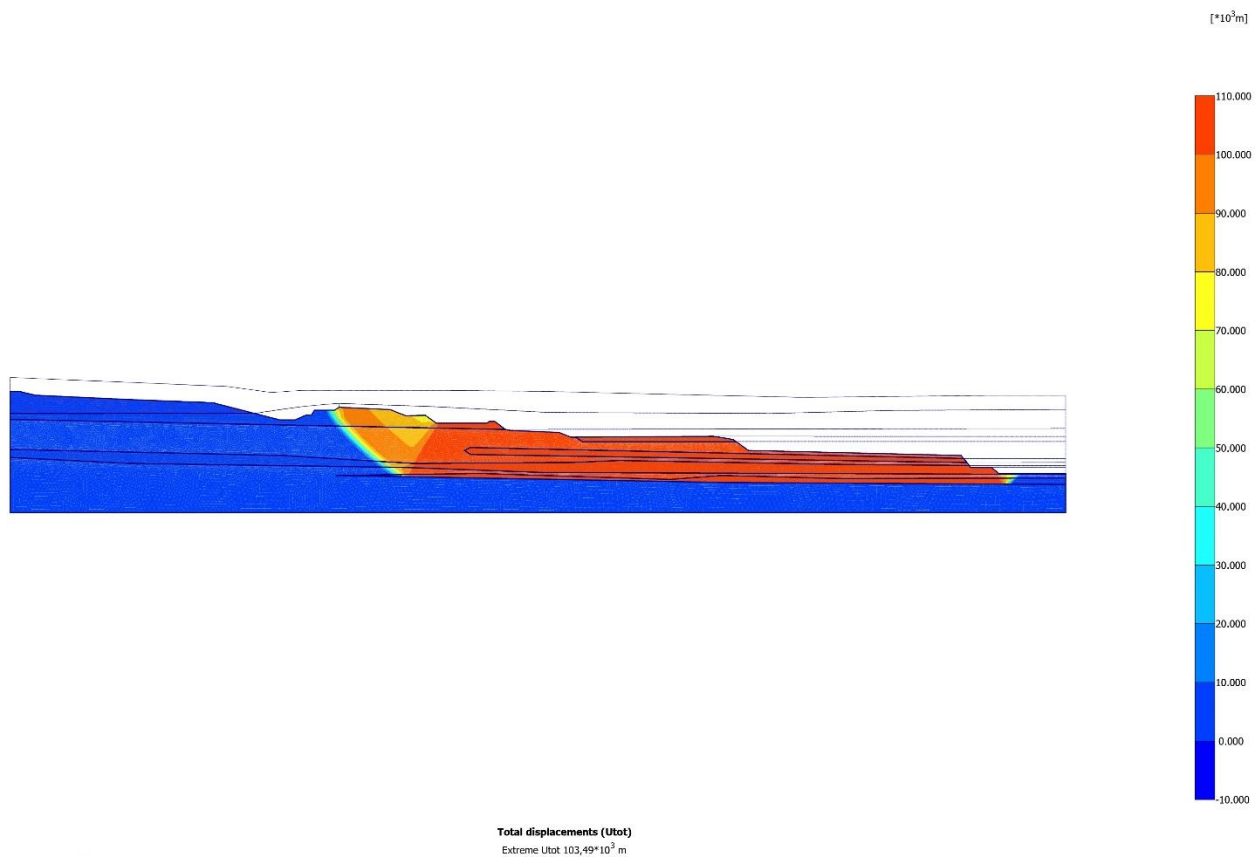
7.2 2^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



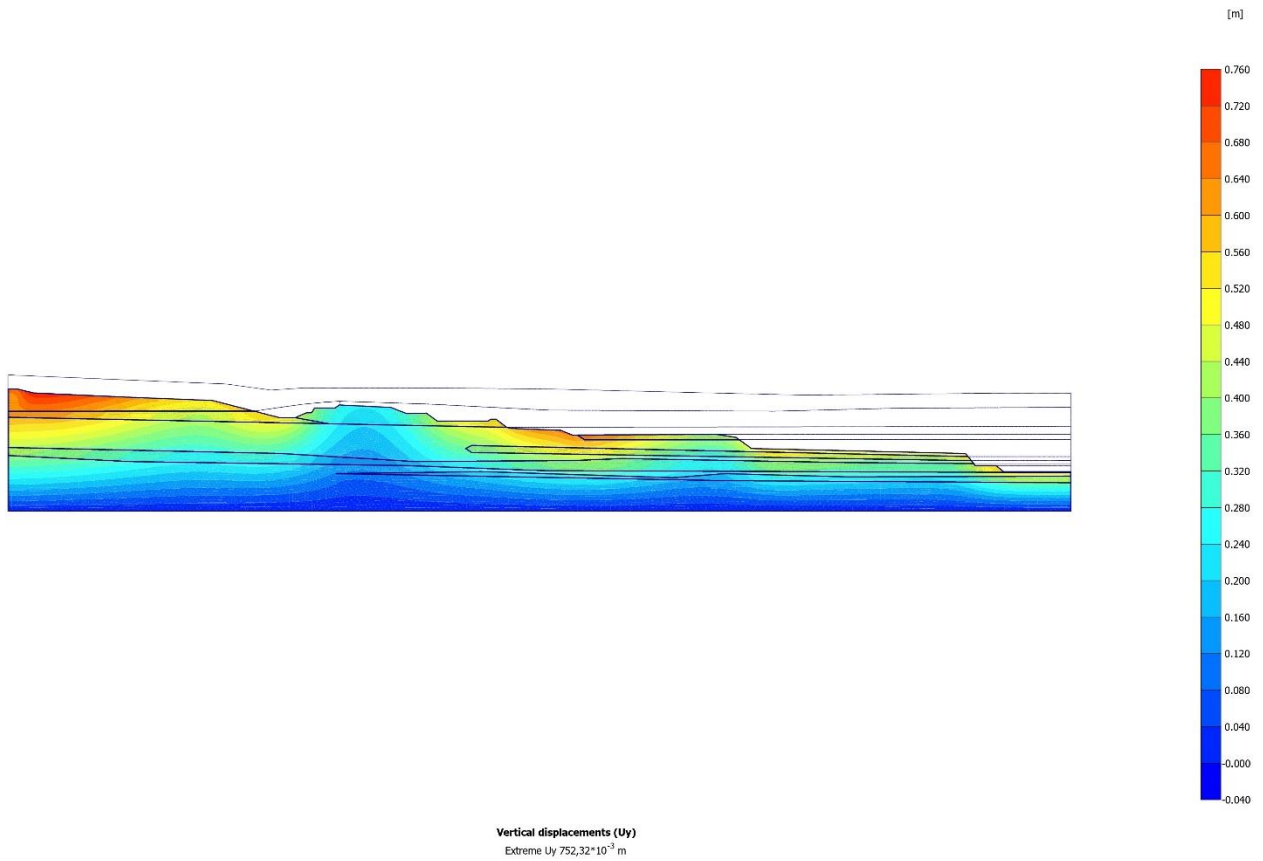
Εικόνα 61. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



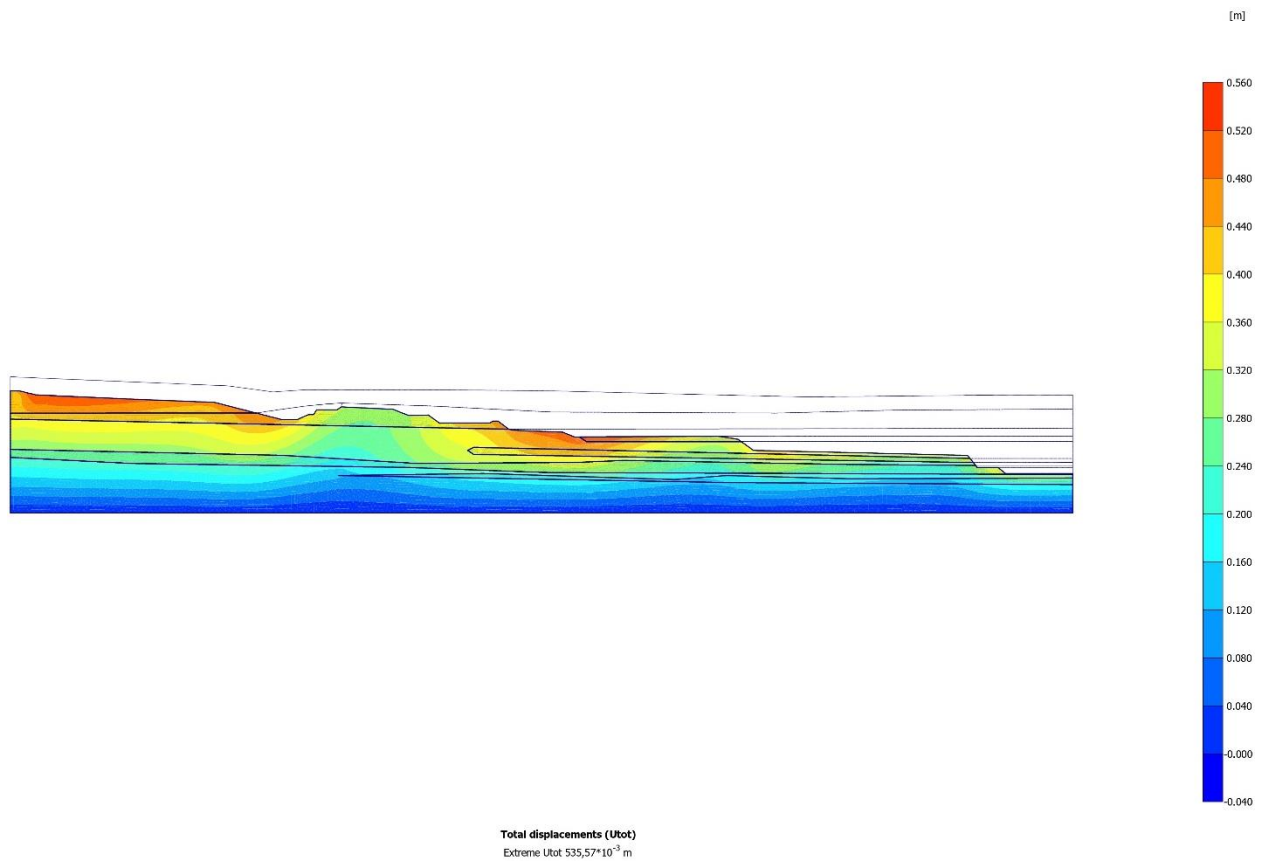
Εικόνα 62. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου



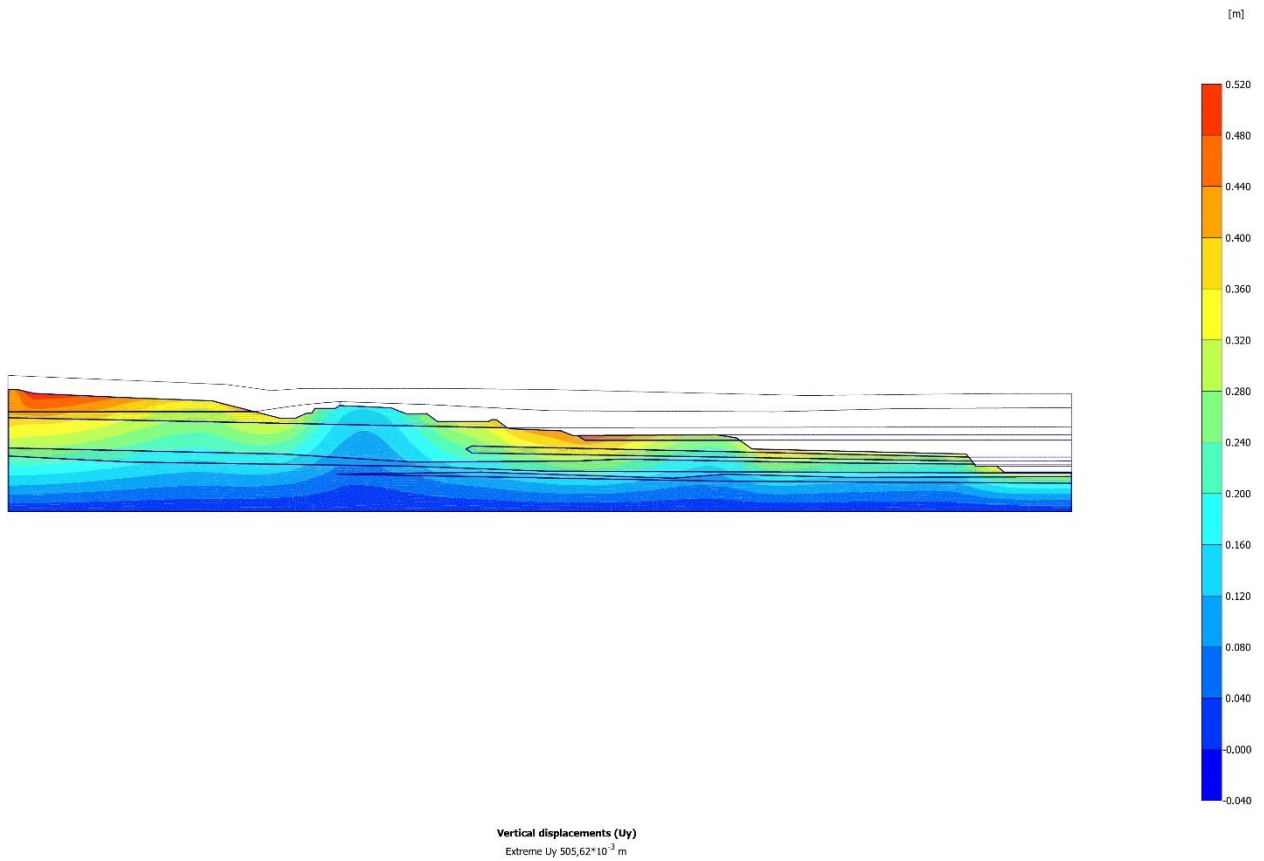
Εικόνα 63. Δονητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=100$ kPa, $\phi=20^\circ$ και $E=40.000$ kPa, και με $c=50$ kPa, $\phi=25^\circ$ και $E=40.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



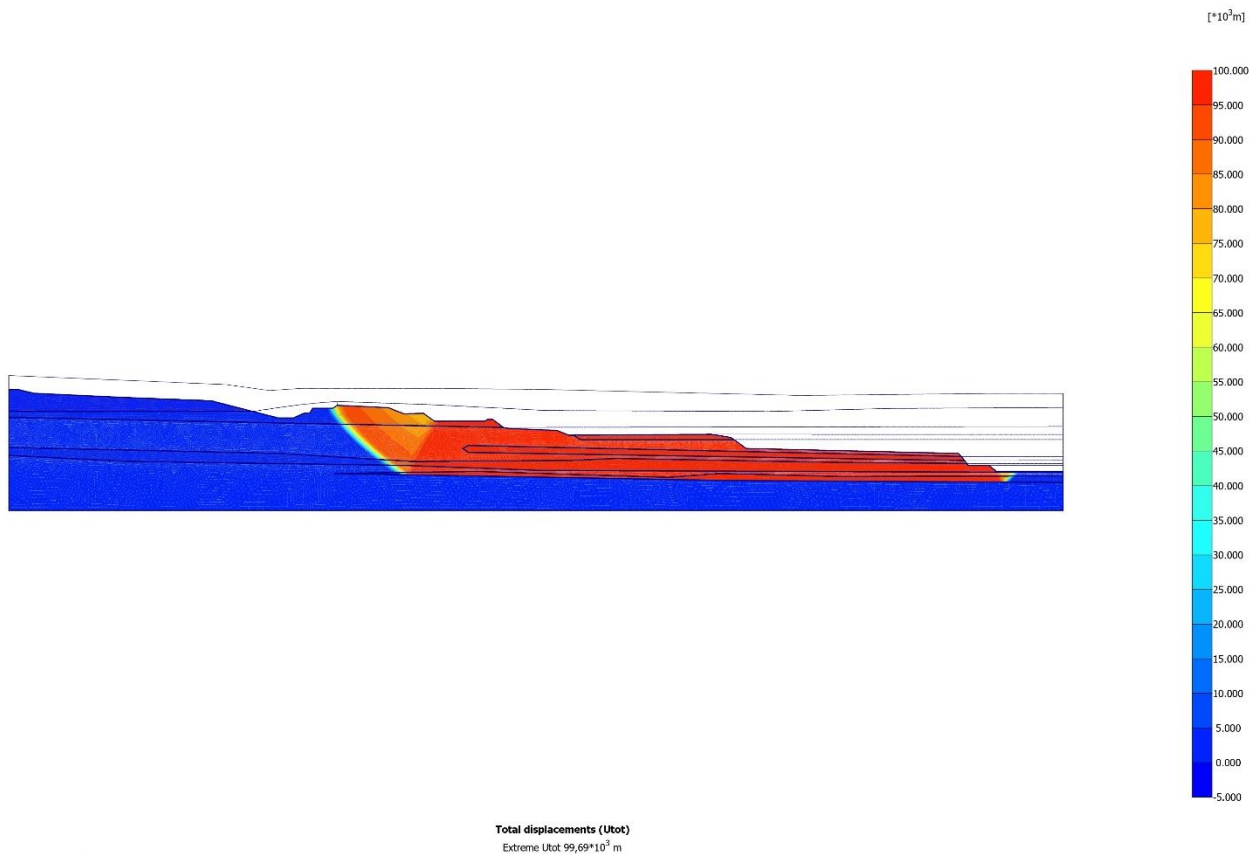
Εικόνα 64. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου



Εικόνα 65. Απεικόνιση των απόλυτων συνολικών μετακινήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

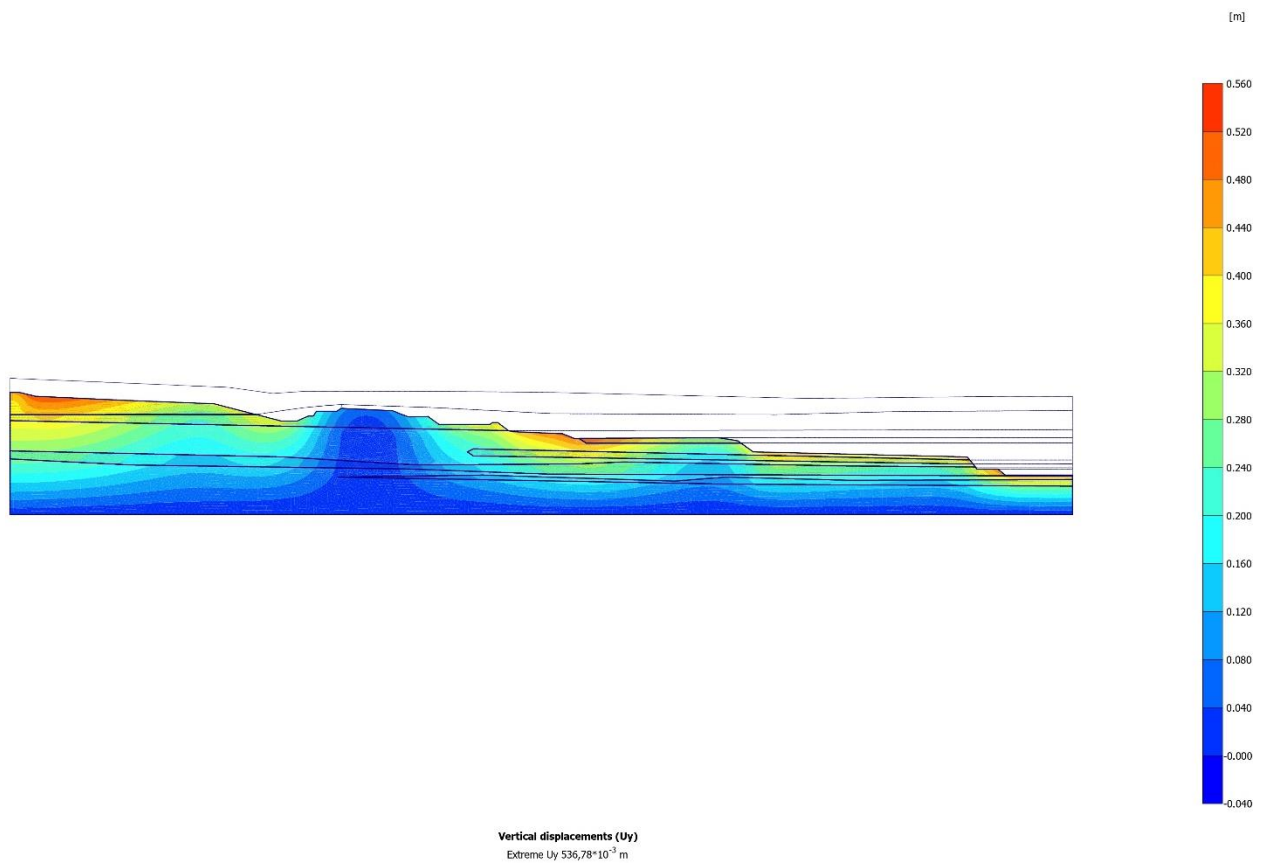


Εικόνα 66. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με προσθήκη υδροφόρου ορίζοντα στο προσομοίωμα, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου

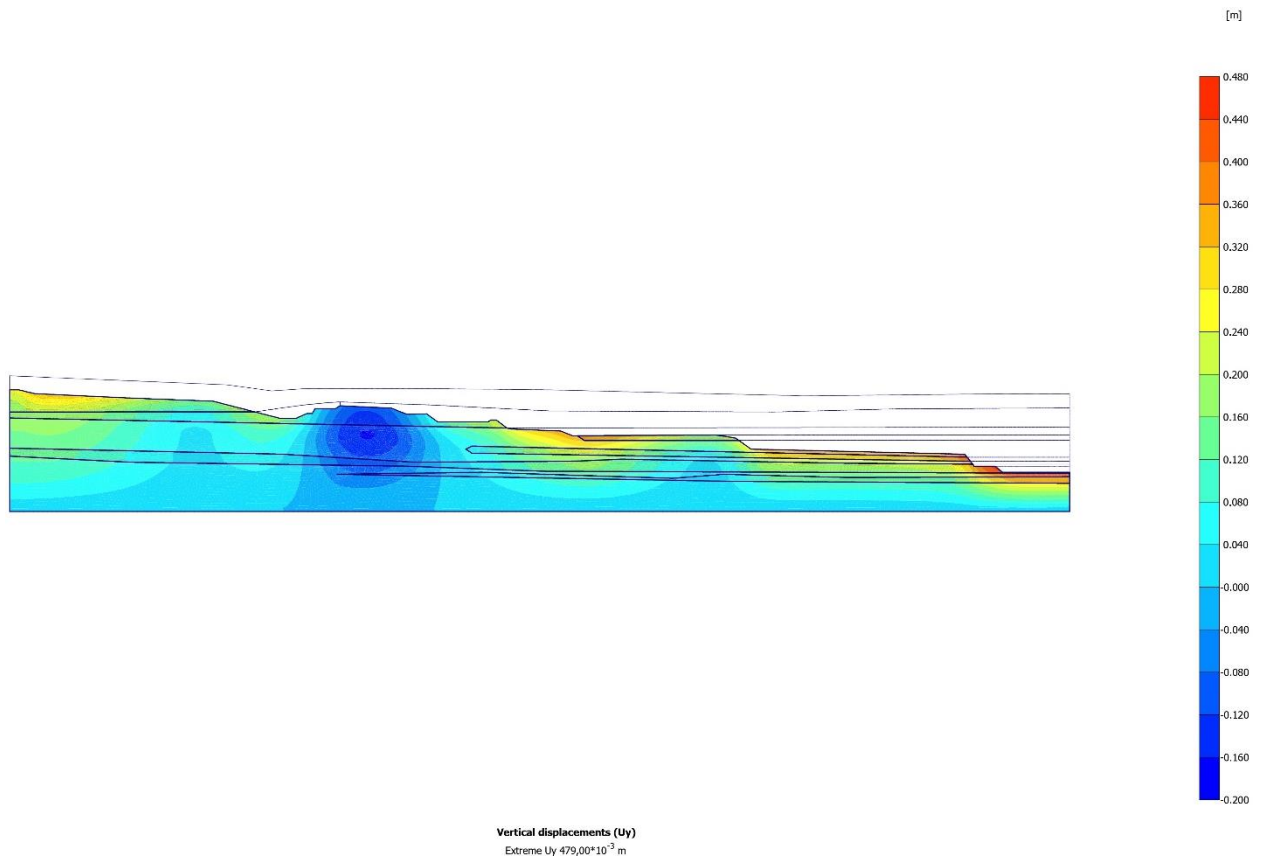


Εικόνα 67. Δυνητικές επιφάνειες αστοχίας της ανοικτής εκσκαφής για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=70$ kPa, $\phi=28^\circ$ και $E=50.000$ kPa, και με $c=30$ kPa, $\phi=35^\circ$ και $E=50.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

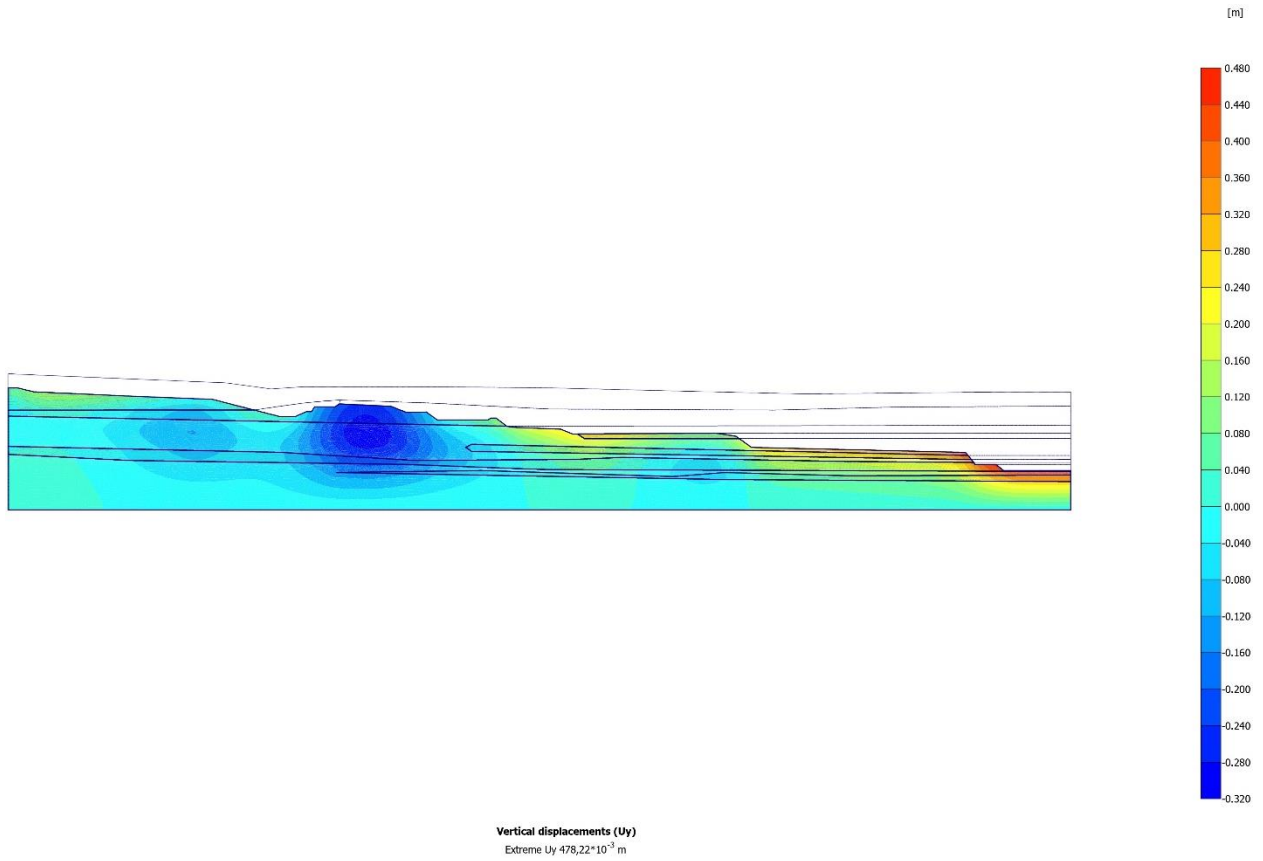
7.3 3^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 68. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 10 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\varphi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\varphi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

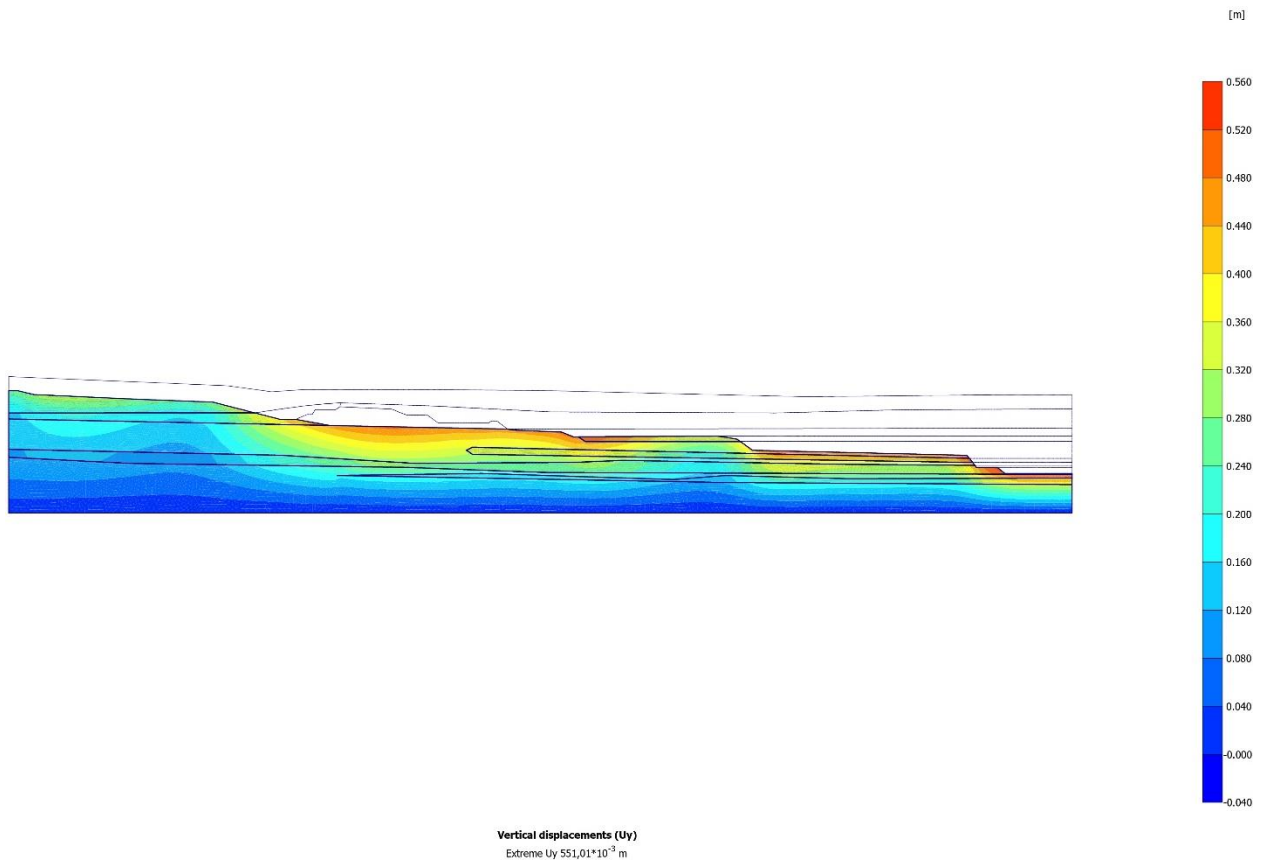


Εικόνα 69. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 20 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.



Εικόνα 70. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ταπεινωμένη κατά 30 m, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.

7.4 4^Η ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ



Εικόνα 71. Απεικόνιση των καθιζήσεων της εκσκαφής, με αφαίρεση τμήματος της ανώτερης λιγνιτικής στιβάδας, για μηχανικά χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων με $c=80$ kPa, $\phi=24^\circ$ και $E=30.000$ kPa, και με $c=43$ kPa, $\phi=30^\circ$ και $E=30.000$ kPa για τις αποθέσεις ερυθρής αργίλου.